

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



Incorporação do Conhecimento Geológico em Métodos de Interpolação Espacial: Aplicação à Prospeção Geoquímica

Mestrado em Geologia Aplicada
Geologia de Engenharia

Ana Cláudia Simão Abreu

Dissertação orientada por:
Mário Abel Carreira Gonçalves
Rui Pires de Matos Taborda

Aos meus pais...

AGRADECIMENTOS

É com esta dissertação que concluo o Mestrado em Geologia Aplicada, Especialização em Geologia de Engenharia. Esta jornada não teria sido a mesma sem o apoio das pessoas que me rodeiam e que muito me ajudaram.

Em primeiro lugar queria agradecer aos meus pais que sempre me incentivaram a estudar e me apoiaram em todas as decisões para seguir este caminho. Sem eles nada seria possível e nada faria sentido.

Um agradecimento especial ao Prof. Rui Taborda com quem iniciei este percurso e me ajudou a decidir qual o caminho a seguir. Um muito obrigado pela boa disposição, ideias, ensinamentos e paciência.

Ao Prof. Mário Gonçalves que connosco embarcou nesta aventura e ajudou a definir o caminho a seguir e que estabeleceu os contactos necessários para podermos seguir em frente. Um obrigado pela boa disposição e pelas horas de partilha de conhecimento.

Um muito obrigado ao Prof. António Mateus pela disponibilidade, quer na obtenção do banco de dados, quer na definição dos Índices Geoquímicos.

À Dra. Maria João Batista (LNEG) pelo banco de dados sem o qual não seria possível levar este estudo adiante.

Aos familiares e amigos que me apoiaram nesta jornada e que compreendem a minha vontade de estudar e aprender coisas novas todos os dias.

À Wendy Malvar que muito me ensinou a nível profissional e me ajudou no desfecho desta caminhada.

À Cristina que sempre me apoiou e incentivou apesar dos tempos difíceis que temos vivido.

“Pedras no caminho?”

Guardo todas, um dia vou construir um castelo...”

Fernando Pessoa

RESUMO

Portugal tem importantes recursos de matérias-primas minerais metálicas, em especial Cu e W. A diversidade geológica do território nacional tem suportado atividades de prospeção e exploração desde os tempos pré-romanos. De entre os principais tipos de sistemas mineralizantes existentes na Zona Centro Ibérica (ZCI) salientam-se os de W-Sn, de Au(-Ag), de U e de Li. Neste contexto, os sedimentos de corrente têm sido um dos meios de amostragem mais usados na cartografia geoquímica, servindo de referência à cartografia geológica, prospeção mineral e estudos metalogénicos.

O principal objetivo desta dissertação é explorar a utilização de ferramentas de interpolação espacial (inverso da distância, krigagem e cokrigagem) para mapear os elementos e índices geoquímicos de amostras de sedimentos de corrente.

A análise estatística univariada mostrou que a maioria dos elementos estudados apresenta concentrações com distribuição com simetria positiva e média superior à média da crosta continental. Através da análise estatística bivariada foi possível observar que a correlação entre os diversos elementos evidência a presença de litologias metasedimentares na área em estudo (SiO_2 e Al_2O_3) e a presença de domínios mineralizados de W-Sn e Au-Ag.

Realizaram-se diversos testes para validação dos modelos de interpolação utilizando 2 elementos com distribuições contrastantes: Cu e SiO_2 . Neste conjunto de testes, que se baseou num conjunto de amostras independente do conjunto utilizado na interpolação, foram determinadas várias estatísticas de erro, incluindo o erro quadrado médio, em mais de 10000 de ensaios. Nos testes realizados para o Cu observou-se que os resultados são relativamente independentes da densidade de amostragem (para uma distância média ao vizinho mais próximo superior a 1 km) e que os resultados obtidos com métodos do inverso da distância e da krigagem não são significativamente diferentes. Nos testes realizados para o SiO_2 os resultados obtidos com o melhor modelo de krigagem e do inverso da distância com potência otimizada são virtualmente idênticos.

Utilizando os dois modelos de interpolação otimizados, realizou-se a interpolação para a área em estudo dos elementos/índices. Em complemento à interpolação dos valores de concentração elementar, utilizaram-se índices geoquímicos, cuja qualidade de interpolação se revelou mais elevada, e permitiram obter mapas geoquímicos integrados e realistas.

A distribuição espacial dos índices geoquímicos permitiu delimitar zonas anómalas e áreas com potencial para prospeção, nomeadamente: o Índice de Estanho e Tungsténio (I_{SW}); o Índice de Metais Preciosos (I_{AA}); e

o Índice dos Metais básicos (I_{MB}). O mapeamento dos Índices I_{SW} , I_{AA} e I_{MB} procura condensar a informação de natureza mineralógica e geoquímica, sendo também úteis para uso como variáveis secundárias na estimação espacial de variáveis primárias.

Muitas das zonas anómalas identificadas encontram-se na proximidade de zonas de falhas e/ou na proximidade de ocorrências minerais conhecidas e/ou jazidas exploradas no passado, demonstrando a fiabilidade dos resultados obtidos.

Palavras-chave: Sedimentos de Corrente, Mapas Geoquímicos, Interpolação Espacial, Tungsténio, Metais Preciosos.

ABSTRACT

Portugal has important resources of mineral raw materials metal, especially Cu and W. The geological diversity has supported prospection and exploration activities since pre-Roman times. Amongst the main mineralizing systems in the Central Iberian Zone (CIZ) it is possible to highlight the W-Sn, Au (-AG), U and Li. In this context, stream sediment sampling is commonly used in geochemical mapping, serving as a reference to geological mapping, mineral exploration and metallogenic studies.

The main objective of this dissertation is to explore the use of spatial interpolation methods (inverse distance, kriging and cokriging) to map the elements and geochemical indexes of stream sediments samples.

The univariate statistical analysis showed that most elements presents positive symmetry concentrations and an average that is higher than the continental crust average. Bivariate statistical analysis, through the computation of the correlation coefficient, put in evidence the presence of metasedimentary lithologies in the study area (SiO_2 and Al_2O_3) and the presence of mineralized areas of W-Sn-Ag and Au.

Validation of interpolation models was performed using 2 elements with contrasting distributions: Cu and SiO_2 . In this set of tests, which was based on a set of independent samples, various error statistics, including root mean square error, were determined in over 10,000 assays. In tests for Cu it was observed that the results are relatively independent of the sampling density (to an average distance to the nearest neighbor above 1 km), and the results obtained with the inverse distance and kriging methods are not significantly different. In tests for the SiO_2 results obtained with the best kriging model and inverse distance with optimized power were virtually identical.

Using the two optimized interpolation models the elements/ indexes were interpolated for the study area. The interpolation of geochemical indexes proved to be higher and enabled integrated and realistic geochemical maps.

The spatial distribution of geochemical indices allows define anomalous areas with potential for exploration, including: the Tin and Tungsten Index (TTI); in Precious Metals Index (PMI); the basic metals index (MBI). The mapping of TTI Indices, PMI and MBI seek to condense the information mineralogical and geochemical nature, and is also useful for use as secondary variables to estimate primary variables.

Many of the anomalous areas are identified in the vicinity of fault zones and / or in the vicinity of known mineral occurrences and / or deposits explored in the past, demonstrating the reality of the results.

Keywords: Stream Sediments, Geochemical Maps, Spatial Interpolation, Tungsten, Precious Metals.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	3
1.1. INTERESSE DO ESTUDO E OBJECTIVOS	3
1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
2. ENQUADRAMENTO	6
2.1. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO	6
2.2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO	6
2.2.1. GEOLOGIA	6
2.2.2. MINERALIZAÇÃO	7
3. MÉTODOS	9
3.1. ETAPAS DO TRABALHO	9
3.2. SEDIMENTOS DE CORRENTE	10
3.3. ÍNDICES GEOQUÍMICOS	12
3.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA	12
3.5. INTERPOLAÇÃO ESPACIAL DOS DADOS	13
3.5.1. IDW	13
3.5.2. KRIGAGEM	14
3.5.3. COKRIGAGEM	16
3.5.4. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA INTERPOLAÇÃO	16
3.5.4.1. VALIDAÇÃO CRUZADA/ VALIDAÇÃO	16
3.5.4.2. COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO	17
3.5.5. AUTOMATIZAÇÃO DO PROCEDIMENTO	18
4. RESULTADOS	19
4.1. REPRESENTAÇÃO DA AMOSTRAGEM	19
4.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA	21
4.2.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA UNIVARIADA	21
4.2.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA BIVARIADA	23
4.3. INTERPOLAÇÃO ESPACIAL DOS DADOS	26
4.3.1. ESCOLHA DO MÉTODO E PARÂMETROS DE INTERPOLAÇÃO	26
4.4. MAPAS GEOQUÍMICOS	33
4.4.1. ÍNDICE DO TUNGSTÊNIO E ESTANHO (I_{SW})	34
4.4.2. ÍNDICE DOS METAIS BÁSICOS (I_{MB})	38
4.4.3. ÍNDICE DOS METAIS PRECIOSOS (I_{AA})	42

5.	CONCLUSÃO	48
6.	BIBLIOGRAFIA	51
	ANEXOS	53

1.1. INTERESSE DO ESTUDO E OBJECTIVOS

Os recursos minerais são de grande importância para a economia e desenvolvimento de um país. O conhecimento geológico de um depósito mineral, das suas características e distribuição são de grande utilidade para a determinação do eventual potencial económico.

Portugal tem importantes recursos de matérias-primas minerais metálicas. A diversidade geológica do território nacional tem suportado atividades de prospeção e exploração de matérias-primas minerais desde tempos pré-romanos (Noronha, 1993). De entre os principais tipos de sistemas mineralizantes existentes na Zona Centro Ibérica (ZCI) salientam-se os de W-Sn, de Au(-Ag), U e de Li (e outras substâncias exploradas em vários campos pegmatitos), (Mateus e Noronha, 2010; Noronha e Lima, 2014). Existe ainda potencial (que deve ser devidamente avaliado) para outros elementos, classificados como matérias-primas críticas, como o berílio, nióbio, germânio, índio, etc., (Noronha e Lima, 2014). A localização de novos jazigos dependerá do aumento do conhecimento geológico, sustentado na utilização de “métodos quantitativos para a análise, interpretação e modelação de dados que descrevem processos naturais ou atributos medidos” (Olea, 1999).

Os sedimentos de corrente configuram um meio de amostragem bastante útil em cartografia geoquímica, uma vez que permitem investigar áreas extensas e pouco conhecidas com custos relativos baixos, podendo ainda servir de referência a trabalhos de cartografia geológica, prospeção mineral e estudos metalogenéticos de maior detalhe (Darnley e Garret, 1990).

Existem alguns estudos que utilizam a análise uni-elementar dos sedimentos de corrente para estudar eventuais anomalias no território nacional, como Ferreira (2000).

A dissertação de mestrado de Luz (2011) utiliza a geoquímica de sedimentos de corrente para a caracterização das assinaturas regionais e locais na Faixa Piritosa Ibérica para a prospeção de sulfuretos maciços.

A área em estudo situa-se no norte do país e compreende os distritos de Vila Real, Bragança, Viseu e Guarda e apresenta uma área de cerca de 5500 km², tendo o rio Douro como principal curso de água. Os dados utilizados neste trabalho integram a base documental do LNEG: 18941 pontos de amostragem em sedimentos de corrente para os quais existe informação geoquímica multi-elementar (Consórcio SPE-SEREM, 1979-1984).

O principal objetivo desta dissertação é explorar a utilização de ferramentas de interpolação espacial, nomeadamente o inverso da distância, a krigagem e a cokrigagem para mapear elementos e indicadores geoquímicos com base em amostras de sedimentos de corrente.

O presente estudo pretende ser um contributo a nível regional, fazendo uso da geoquímica de sedimentos de corrente para um número alargado de elementos úteis à prospeção de vários tipos de mineralizações. Este estudo incide sobretudo nas assinaturas de mineralizações de W-Sn, Cu-Pb-Zn e de metais preciosos num sector NE da Zona Centro Ibérica, ao longo do rio Douro até à fronteira com Espanha.

Para a obtenção de mapas geoquímicos integrados e realistas utilizou-se a distribuição espacial dos valores de concentração de elementos selecionados e dos valores de índices geoquímicos construídos em função da natureza particular dos principais sistemas mineralizantes.

O mapeamento dos Índices do Tungsténio e Estanho (I_{SW}), dos Metais Preciosos (I_{AA}) e dos Metais Básicos (I_{MB}) procura condensar a informação de natureza mineralógica e geoquímica, sendo também úteis para uso como variáveis secundárias na estimação espacial de variáveis primárias, em particular das que possuem um elevado número de amostras abaixo do limite de deteção.

As primeiras etapas para a deteção de anomalias dizem respeito à análise de banco de dados geoquímicos fornecidos por amostras de sedimentos de corrente, a respetiva análise estatística e mapeamento através da utilização de métodos de interpolação espacial da aplicação ArcMap® (Geostatistical Analyst) e da análise de resultados que permitam relacionar os mapas de anomalias com a geologia e tipo de mineralização.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se organizada em seis capítulos. O primeiro capítulo diz respeito à presente introdução, onde se apresenta o enquadramento e motivação para a realização deste trabalho, o ponto de partida e os objetivos a atingir.

A área estudada, o seu enquadramento geográfico, geológico e mineralizações são tratados no segundo capítulo.

O terceiro capítulo diz respeito aos métodos. É feita uma breve explicação das etapas do trabalho, são apresentados os conceitos básicos de sedimentos de corrente, índices geoquímicos, análise estatística e interpolação dos dados.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos: representação da amostragem, análise estatística, interpolação espacial dos dados e mapas geoquímicos.

As considerações finais e a discussão dos resultados obtidos são feitas no quinto capítulo.

O sexto capítulo diz respeito à bibliografia.

2. ENQUADRAMENTO

2.1. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO

A área em estudo situa-se no norte do país e abrange os distritos de Vila Real, Bragança, Viseu e Guarda, cobrindo cerca de 5500 km² e tendo o rio Douro como principal curso de água (Figura 1).

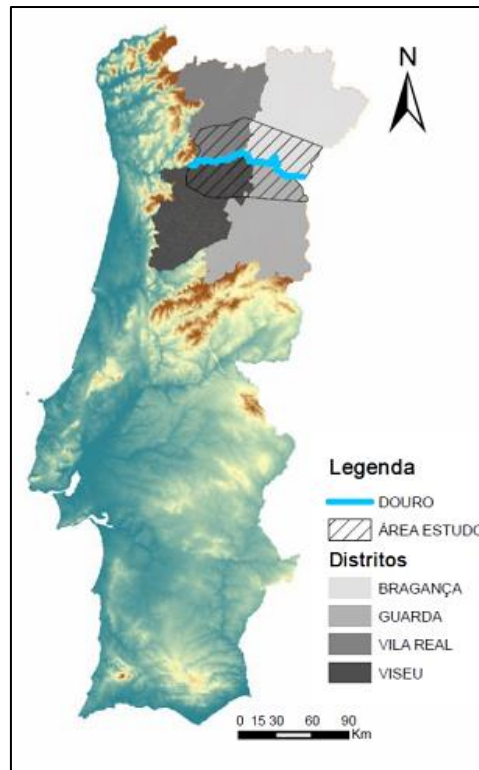


Figura 1 – Enquadramento Geográfico da área em estudo (mapa: Portugal MDT 30m (ETRS89) - ArcGis).

2.2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

2.2.1. GEOLOGIA

A área em estudo (Figura 2) distribui-se pelos sectores de Trás-os-Montes e Douro-Beiras da ZCI, constituída essencialmente por litologias do Complexo Xisto-Grauváquico (Super-Grupo Dúrico Beirão - SGDB) e diversos corpos graníticos de idade Paleozóica (sin e tardi-tectónicos em relação à terceira fase de deformação Varisca). O SGDB corresponde a uma sequência metassedimentar do tipo flysch, marcada por alternâncias entre xistos e metagrauvaques, normalmente não fossilíferos, sobre os quais assentam em discordância, as rochas quartzíticas do Ordovícico e restante sequência siliciclástica até aos horizontes de

idade Silúrica. As rochas graníticas compreendem diversos tipos de fácies e alguns dos corpos ígneos apresentam importantes sistemas filonianos satélite.

Toda a área é cortada por numerosas zonas de cisalhamento e de falha. Destacam-se, nos domínios E e W da área estudada, as falhas NNE-SSW da Vilariça e de Chaves-Régua-Verín, respetivamente.



Figura 2 – Área abrangida pelo presente estudo sobre Carta Geológica (LNEG).

Os depósitos filonianos constituintes da província metalogénica de W-Sn na região centro e norte de Portugal, associam-se usualmente a granitos Variscos (Thadeu, 1965; Schermerhorn, 1981; Noronha, 2013). As mineralizações de Au (-Ag \pm As, Sb), epigenéticas, relacionam-se maioritariamente com preenchimentos siliciosos hidrotermais dispostos ao longo das zonas de falhas tardi-Variscas, podendo também ocorrer em domínios silicificados que se desenvolvem na sua dependência espacial (Noronha, 2013).

2.2.2. MINERALIZAÇÃO

A Zona Centro Ibérica (ZCI) é uma das zonas geotectónicas da cadeia Varisca na Península Ibérica com um importante potencial metalogenético. Os diversos sistemas mineralizantes estão geralmente associados à orogenia Varisca, a qual é não só responsável pelo dobramento das diferentes sequências sedimentares datadas do Pré-Câmbrico Superior ao Silúrico como pelas intrusões graníticas (responsáveis pela introdução e remobilização de grandes quantidades de elementos metálicos), e restantes sistemas de

cisalhamento/falha que cortam estas litologias e que, em grande parte, servem de condutas para a intensa circulação de fluidos hidrotermais com mineralização metalífera associada. Os sistemas mineralizantes na ZCI são por isso variados e incluem corpos pegmatíticos, domínios de metassomatismo de contato, campos filonianos associados a intrusões graníticas e preenchimentos hidrotermais em zonas de cisalhamento e de falha. Os depósitos hidrotermais de W, W-Sn, W-Mo e Sn, da chamada “Província Metalogénica de W-Sn” na região centro e norte de Portugal são, seguramente, os mais importantes encontrando-se frequentemente relacionados com a instalação de granitos variscos tardi-D3 (Neiva, 1944; Noronha, 2013).

Em virtude das características apresentadas no parágrafo anterior, a atividade mineira encontra-se bem representada na área em estudo. As mineralizações predominantes na área estudada são: de Estanho e /ou Volfrâmio associadas a zonas de contacto entre granitos e metassedimentos, pegmatitos, filões de quartzo e, no caso do W, podem ainda ocorrer na forma de skarns; de metais preciosos Au e Ag, frequentemente associadas a As e Sb, em filões de quartzo, podendo também ocorrer em zonas silicificadas; de Urânio relacionados com reactivação tectónica tardia e bem mais recente (Alpino) que afectam os granitos calco-alcalinos; e de Ferro em sequências sedimentares quartzíticas do Ordovício. Na Figura 3 estão representadas as principais ocorrências de minerais metálicos em Portugal (Ferreira, 2000).

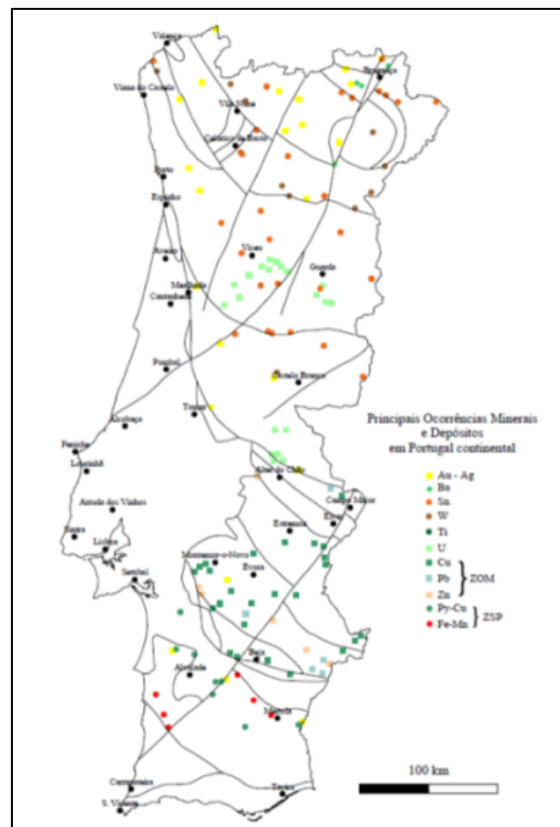


Figura 3 – Principais ocorrências de minerais metálicos em Portugal (Ferreira, 2000).

3.1. ETAPAS DO TRABALHO

Numa primeira fase analisou-se a base de dados de forma a identificar as informações úteis para o estudo e recolheu-se informação sobre a área em estudo. De seguida realizou-se a análise estatística, univariada e bivariada, com a elaboração de gráficos de distribuição e procura de padrões e fez-se a representação espacial dos dados utilizando a aplicação ArcMap®. Posteriormente fez-se a análise geoestatística efetuando-se a interpolação dos dados utilizando diferentes métodos e analisando os resultados da respetiva validação. Por fim fez-se o mapeamento dos elementos e índices geoquímicos e analisaram-se os resultados tendo por base a geologia e tipo de mineralização da área em estudo (Figura 4).

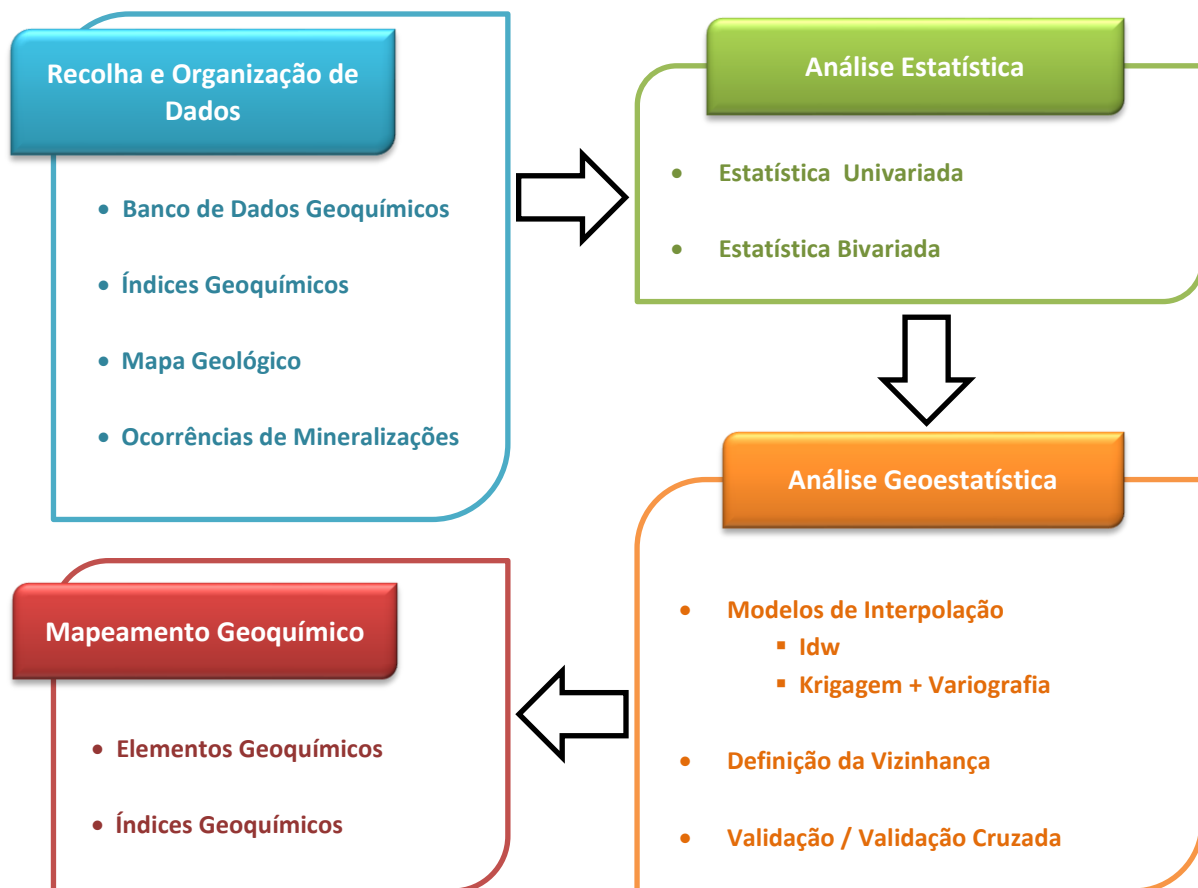


Figura 4 - Resumo esquemático da metodologia adoptada.

3.2. SEDIMENTOS DE CORRENTE

A geoquímica de sedimentos de corrente, como a prospeção geoquímica em geral, é fundamental para a detecção de anomalias de elementos químicos com interesse económico. Neste contexto, poderemos definir anomalia como o valor de concentração de um elemento químico que é superior à concentração média desse mesmo elemento numa dada região. Sendo os depósitos minerais resultado da acumulação de metais por processos geológicos ao longo do tempo, haverá necessariamente uma relação entre as anomalias geoquímicas detetadas em sedimentos de corrente e os respetivos depósitos minerais na sua vizinhança. As campanhas de geoquímica de sedimentos de corrente têm a enorme vantagem de permitirem investigar grandes áreas, em especial se forem pouco conhecidas, com custos muito baixos. Para além do seu valor como método de prospeção mineral, possibilitam a detecção de contaminações devidas à atividade humana.

Os dados utilizados neste trabalho integram a base documental do LNEG com 18941 pontos de amostragem em sedimentos de corrente, colhidas no Rio Douro e seus afluentes, para os quais existe informação geoquímica multi-elementar - 10 óxidos de elementos maiores (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , MnO , P_2O_5) e 24 elementos menores e traço (Li, Be, B, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Sn, Sb, Ba, La, W, Pb, Bi) - Anexo A. O padrão químico das amostras recolhidas vai depender da assinatura da geometria da rede de drenagem, da geologia, e dos tipos de mineralização.

Como primeira aproximação em prospeção mineira pode considerar-se como teores de base aqueles que correspondem à concentração média na crosta terrestre (Tabela 1). No entanto, estes valores podem alterar-se significativamente em função das litologias presentes nas áreas prospetadas, ou seja, haverá associações litológicas, cujos teores médios em certos elementos é muito superior à média crustal.

Tabela 1 – Concentração média da crosta terrestre dos elementos estudados (adaptado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080959757003016>).

<i>Elemento</i>	<i>Concentração média da Crusta Terrestre (ppm)</i>
Cu	27
Zn	72
Ag	0,056
As	2,5
Sb	0,2
Sn	1,7
W	1

É ainda importante considerar os valores do limite de detecção dos métodos analíticos para cada elemento (Tabela 2). O limite de detecção é a menor concentração de uma substância que pode ser detetada, mas não necessariamente quantificada, e que varia consoante o método utilizado.

Tabela 2 – Limites de detecção utilizados no estudo (adaptado de ICP-ES & ICP-MS).

<i>Limites de Detecção (ppm)</i>						
Ag	Sb	As	W	Sn	Cu	Zn
0.1	5	1	1	2	2	2

A presença de determinadas associações de elementos (Tabela 3) pode indicar a existência de determinadas formações geológicas (Neto, 2010).

Tabela 3 - Associações químicas de elementos traço (Neto, 2010).

<i>Associação Plutónica</i>		<i>Minerais de Sulfuretos Hidrotermais</i>	
Rochas Ultramáficas	Cr, Co, Ni, Cu	Associações Gerais	Cu, Pb, Zn, Mo, Au, Ag, As, Hg, Sb, Se, Te, Co, Ni, U, V, Bi, Cd
Rochas Máficas	Ti, V, SC	Depósitos de cobre porfiroide	Cu, Mo, Re
Rochas Alcalinas	Ti, Nb, Ta, Zr, RE, F, P	Sulfetos Complexos	Hg, As, Sb, Se, Ag, Zn, Cd, Pb
Carbonatitos	RE, Ti, Nb, Ta, P, F	Sulfetos de Baixa Temperatura	Bi, Sb, As
Rochas Graníticas	Ba, Li, W, Mo, Sn, Zr, Hf, U, Th, Ti	Depósitos de Metais Básicos	Pb, Zn, Cd, Ba
Pegmatitos	Li, Rb, Cs, Be, RE, Nb, Ta, U, Th, Zr, Hf, Sc	Metais Preciosos	Au, Ag, Cu, Co, As
		Metais Preciosos associados a R. Máficas	Ni, Cu, Pt, Co

A presença de alguns elementos (elemento farejador) pode indicar a existência de determinado depósito mineral (Tabela 4).

Tabela 4 – Relação de alguns elementos farejadores de depósitos minerais (adaptado de Neto, 2010).

<i>Deposito Mineral</i>	<i>Elemento Procurado</i>	<i>Elemento Farejador</i>
Depósitos complexos de sulfuretos	Zn, Cu, Ag, Au	Hg, As, S, Sb, Se, Cd, Ba, F, Bi
Veios de metais preciosos	Au, Ag	As, Sb, Te, Mn, Hg, I, F, Bi, Co, Se, Ti
Depósitos do tipo Skarn	Mo, Zn, Cu	B, Au, Ag, Fe, Be
Uranio em veios	U	Cu, Bi, As, Co, Mo, Ni, Pb, F
Corpos Ultramáficos de ouro	Pt, Cr, Ni	Cu, Co, Pb
Veios de Fluorite	F	Y, Zn, Rb, Hg, Ba

3.3. ÍNDICES GEOQUÍMICOS

Considerando os valores de concentração disponíveis testaram-se diversos índices geoquímicos, que procuram condensar a informação de natureza mineralógica e geoquímica, sendo também úteis para uso como variáveis secundárias na estimação espacial de variáveis primárias, em particular daquelas com um elevado número de amostras abaixo do limite de deteção.

Os índices geoquímicos foram elaborados de forma a permitir a identificação de depósitos de Tungsténio e Estanho (I_{SW}), Metais Básicos (I_{MB}) e Metais Preciosos (I_{AA}). Os índices considerados foram (A. Mateus, com. pess.):

- $I_{SW} = [(Sn+W+Nb+Mo+Y)/(Sn+W+Nb+Mo+Y+Zn+Pb+Bi+Sb)] \times 100$
- $I_{MB} = [(Zn+Cu+Ni+Co+Cd+Pb+Bi)/(Zn+Cu+Ni+Co+Cd+Pb+Bi+La+Sr+Ba)] \times 100$
- $I_{AA} = [(As+Ag+Sb+Bi)/(As+Ag+Sb+Bi+La+Sr+Ba)] \times 100$

O I_{SW} pretende associar depósitos de W e Sn, que se observam em mineralizações do tipo filoniano, em alguns pegmatitos e em zonas de metamorfismo de contacto. O I_{MB} pretende associar mineralizações ricas em sulfuretos. E o I_{AA} pretende associar mineralizações de metais preciosos.

Em particular no caso do índice I_{AA} os elementos apresentavam um elevado número de amostras com concentrações inferiores ao limite de detecção (LD), sendo necessário excluir as amostras $As \leq LD + Ag \leq LD + Sb \leq LD + Bi \leq LD$. Consideraram-se assim para o cálculo do I_{AA} , 14933 amostras.

A partir da distribuição espacial dos valores de concentração multi-elementares e/ou índices geoquímicos, pretende-se delimitar anomalias com potencial interesse em prospeção, uma vez que se trata de uma zona com características geológicas e tipos de mineralização muito variadas, e com bastantes depósitos de minerais conhecidos (antigas explorações mineiras).

3.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

O procedimento inicial compreendeu a análise estatística univariada dos 10 óxidos de elementos maiores (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , MnO , P_2O_5) e dos 24 elementos menores e traço (Li, Be, B, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Sn, Sb, Ba, La, W, Pb, Bi) analisados por espectrometria por plasma (Consórcio SPE-SEREM, 1979-1984). Excluíram-se, para efeitos de análise estatística e de interpolação, todas as amostras com valores de concentração elementar abaixo dos limites de detecção dos métodos analíticos empregues.

A análise estatística bivariada consistiu no cálculo do coeficiente de correlação de Pearson (r), que quantifica a correlação entre pares de variáveis. O coeficiente de correlação pode variar entre -1,00 e +1,00. Se $r = 1$ existe correlação positiva, se $r = -1$ a correlação é negativa e se $r = 0$ as variáveis não estão correlacionadas (Davis, 2002).

3.5. INTERPOLAÇÃO ESPACIAL DOS DADOS

Existem mais de 40 métodos de interpolação, que podem ser divididos em três categorias: determinísticos, geoestatísticos e métodos combinados (Armstrong, 1998; John, 2002; Johnston, 2001; Li, 2008 e Soares, 2006).

Os métodos determinísticos, como o método dos polígonos de influência, a triangulação e o inverso da distância, criam superfícies a partir de pontos medidos com o auxílio de fórmulas matemáticas simples. As vantagens destes métodos são a facilidade de aplicação e a capacidade de adaptação a qualquer tipo de mineralização. Por outro lado apresentam também desvantagens como a tendência para sobrestimar reservas e poderem apresentar erros elevados, quando se aplicam de um modo arbitrário.

As técnicas geoestatísticas geram modelos de previsão de superfície, que incluem a incerteza na previsão. São métodos que se baseiam na noção de variável regionalizada e de função aleatória.

Neste trabalho serão testados os métodos do inverso da distância (Idw), a krigagem e a cokrigagem.

3.5.1. IDW

O método do inverso da distância (idw) materializa de forma direta o pressuposto que os valores de amostra mais perto do local de previsão têm mais influência sobre o valor, que os valores de amostras mais afastados, ou seja, a influência de cada valor na estimação diminui à medida que a distância ao ponto a estimar aumenta. Este método deve ser utilizado quando o conjunto de pontos é suficientemente denso para capturar a amplitude das variações da superfície. O idw é uma técnica de interpolação que pressupõe uma certa continuidade espacial, não sendo aconselhável para situações em as variáveis possuem limites muito bem definidos e com transições bruscas, mas sim a variáveis em que as transições ocorrem de forma gradual. Este método pode ser adequado para uma visualização ou interpretação preliminar da interpolação de uma superfície, é um método exato, mas que não avalia localmente os erros de previsão (Soares, 2006).

3.5.2. KRIGAGEM

Os métodos geoestatísticos compreendem 2 fases: a variografia e a predição. A variografia permite medir a continuidade espacial das características de um recurso natural ou de um fenómeno natural, como por exemplo o biponto (par de pontos separados de h), que permite avaliar a variação da continuidade espacial em diferentes direções (Soares, 2006).

Para observar o grau de dependência espacial entre pontos de amostragem, utiliza-se a semi-variância que é expressa pela seguinte expressão:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad \text{EQ.1}$$

onde: $\gamma(h)$ é a medida da dependência espacial entre pontos de amostragem; $z(x_i)$ é a concentração num ponto; $z(x_i+h)$ é a concentração noutro ponto à distância h ; e n é o número total de amostras.

De forma a obter a expressão matemática que representa de forma contínua a distribuição espacial da variável em estudo, é possível ajustar o variograma experimental a uma função. As funções mais utilizadas são a esférica, gaussiana e exponencial (Figura 5).

É necessário também considerar diferentes parâmetros para o ajuste do variograma: o alcance, o patamar e o efeito pepita (Figura 6). O efeito pepita traduz a continuidade na origem, sendo que um valor elevado deste parâmetro indica que se observam grandes variações no valor da variável a distâncias curtas. Neste caso a variável exibe comportamento errático com reduzida correlação espacial. O patamar é o limite superior para o qual tendem os valores do variograma com o aumento dos valores de h .

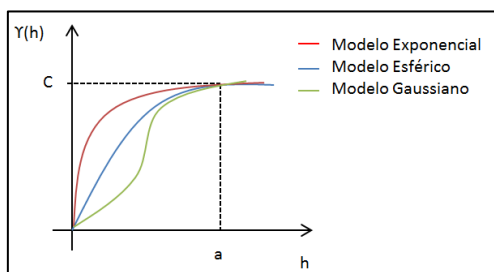


Figura 5 - Representação gráfica de modelos transitivos normalizados.

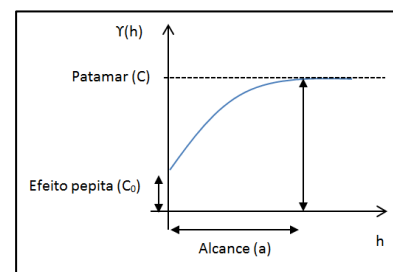


Figura 6 - Parâmetros do Semivariograma.

O alcance é a distância a partir da qual os valores estabilizam ou seja o variograma atinge o patamar. A continuidade espacial de um recurso natural pode variar com as diferentes direções do espaço. Considera-se que a variável é isotrópica, quando o variograma tem o mesmo comportamento em todas as direções. No caso de existir uma direção preferencial de continuidade espacial, diz-se que a variável é anisotrópica.

A partir da análise da forma do variograma é possível perceber que tipo de distribuição espacial é que representada (Figura 7). Quando existe uma grande diferença entre medições feitas em locais adjacentes, o variograma é quase horizontal e constante (efeito de pepita puro), Figura 7-A. Numa situação intermédia (Figura 7-B), existe alguma correlação espacial entre as amostras e o efeito de pepita é praticamente zero. Quando a correlação espacial entre as amostras é muito maior, o variograma apresentava uma menor variação junto à origem, Figura 7-C.

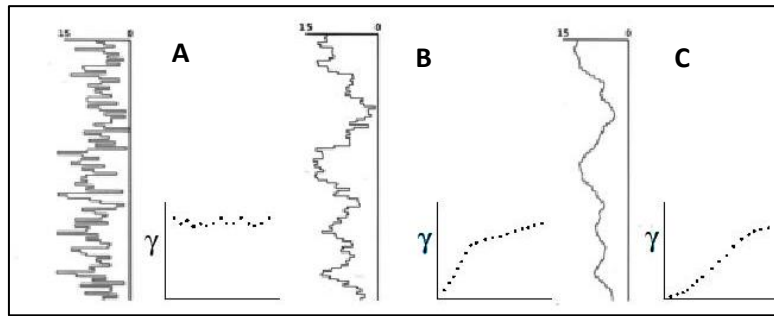


Figura 7 - Semivariogramas em variáveis com estrutura espacial diferentes (Martins e Sousa, 2002).

A krigagem é um método de interpolação que permite fazer a interpolação de um ponto para a vizinhança e que leva em consideração o valor, posição, distância e continuidade espacial das amostras, Krige (1951).

Considera-se que o método de krigagem é um BLUE (Best Linear Unbiased Estimator - Melhor Estimador Linear não-enviesado). É linear porque as suas estimativas são combinações lineares ponderadas dos dados vizinhos, é não enviesado pois procura que a média dos erros (desvios entre o valor real e o valor estimado) seja nula e é o melhor porque os erros de estimação apresentam uma variância mínima.

A estimação por krigagem é dada pela expressão $K = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot z(x_i)$, onde n é o numero de amostras, ω_i é o peso atribuído ao ponto amostrado e $z(x_i)$ é o valor medido no ponto.

A estimação pode ainda ser condicionada pelas características estruturais locais (falhas, mudanças de litologia,...) que podem originar a mistura de populações. Convém ainda salientar que o processo de estimação requer um regresso sistemático aos valores observados e validação dos modelos de variograma.

3.5.3. COKRIGAGEM

A cokrigagem é o método de interpolação utilizado quando se pretende usar uma variável secundária (como variável auxiliar) para a estimação da variável principal. Por exemplo, existindo uma correlação entre a variável a estimar e um parâmetro, cuja medição é fácil e de baixo custo, a cokrigagem possibilita uma melhor interpolação da variável primária em domínios menos amostrados mas onde existe (ou pode ser obtido com facilidade) informação sobre a variável secundária. Estas podem ser incorporadas no modelo de estimação, desde que exista alguma correlação entre as duas variáveis (por exemplo a precipitação e a altimetria ou a concentração de dois elementos de um jazigo mineral).

A cokrigagem é muito flexível e depende da autocorrelação espacial entre as variáveis, que deve ser alta para que as estimativas sejam consistentes. A cokrigagem procura minimizar a variância dos erros de estimativas, explorando a correlação cruzada entre diversas variáveis, ou seja, as estimativas são feitas com base nos variogramas cruzados efetuados entre as variáveis de interesse.

3.5.4. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA INTERPOLAÇÃO

3.5.4.1. VALIDAÇÃO CRUZADA/ VALIDAÇÃO

Para verificar e avaliar a qualidade do modelo de interpolação utiliza-se a validação cruzada ou a validação.

Na validação cruzada é removido um ponto do conjunto de dados e usa-se os restantes para prever o valor daquele local. Para cada ponto (ou seleção aleatória de um sub-conjunto) o valor estimado é comparado com o valor medido (e que foi removido). Este processo é repetido para todas as amostras do conjunto de dados e fornece pares de valores previstos e conhecidos que podem ser comparados para avaliar o desempenho do modelo. Para tal, podem ser utilizados gráficos x-y de valores previstos e valores conhecidos, que permitem definir uma nuvem de dispersão que representa os desvios e tendências das estimativas em relação aos valores da reta ideal $x=y$. Os valores devem estar próximos desta reta, os pontos abaixo dessa reta indicam subestimação e pontos acima, sobreestimação.

Os resultados podem ainda ser validados com conjuntos de dados independentes. Ao banco de dados inicial é retirado uma parte dos dados que é posteriormente utilizada na validação. Este método permite avaliar as previsões usando um conjunto de dados que não estava envolvido na criação do modelo de previsão, ao contrário do que acontece da validação cruzada.

Devido à extensão do banco de dados, optou-se por retirar inicialmente 20% das amostras para serem utilizadas como conjunto de validação.

3.5.4.2. COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO

O coeficiente de determinação R^2 é uma medida que permite avaliar a qualidade de ajustamento entre os dados observados e os valores estimados. O valor de R^2 varia entre 0 e 1 (ajuste perfeito) e permite avaliar a dependência entre as variáveis. R^2 é determinado através da razão entre a variação explicada pelo modelo e a total.

A soma total dos quadrados (SQt) corresponde à soma dos quadrados das diferenças entre a média (\bar{x}) e cada valor observado (x_i).

$$SQt = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{EQ.2}$$

A soma dos quadrados explicada (SQe) é a soma dos quadrados das diferenças entre a média das observações (\bar{x}) e o valor estimado para cada observação (\hat{x}).

$$SQe = \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \bar{x})^2 \quad \text{EQ.3}$$

A soma dos quadrados dos desvios (SQd) é a soma dos quadrados das diferenças entre cada valor observado (x_i) e cada valor estimado (\hat{x}).

$$SQd = \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2 \quad \text{EQ.4}$$

A soma total dos quadrados (SQt) é igual à soma dos quadrados explicada (SQe) com soma dos quadrados dos desvios (SQd).

$$SQt = SQe + SQd \quad \text{EQ.5}$$

A qualidade do modelo pode ser assim avaliado por: $R^2 = \frac{SQe}{SQt}$ EQ.6

A raiz quadrática média (root mean square - rms) é uma medida da diferença entre os valores interpolados e observados e pode ser calculada a partir da expressão:

$$RMS = \sqrt{\frac{SQd}{n-1}} \quad \text{EQ.7}$$

3.5.5. AUTOMATIZAÇÃO DO PROCEDIMENTO

Para fazer a interpolação espacial dos dados utilizou-se o ArcMap®, nomeadamente a extensão Geostatistical Analyst, que permite modelar dados espaciais usando métodos determinísticos e geoestatísticos.

Utilizou-se também o Model Builder, que permite criar, editar e gerir fluxos de trabalho, através de uma sequência de ferramentas de geoprocessamento e conjuntos de dados, e utiliza os dados de saída de um processo como a entrada de outro processo. Visualmente é fácil compreender a sequência do fluxo de trabalho. O cálculo do RMS para cada teste foi automatizado com recurso ao Model Builder de forma a repetir o procedimento para 50 amostras diferentes seleccionadas aleatoriamente do conjunto original (Figura 8 e Figura 9).

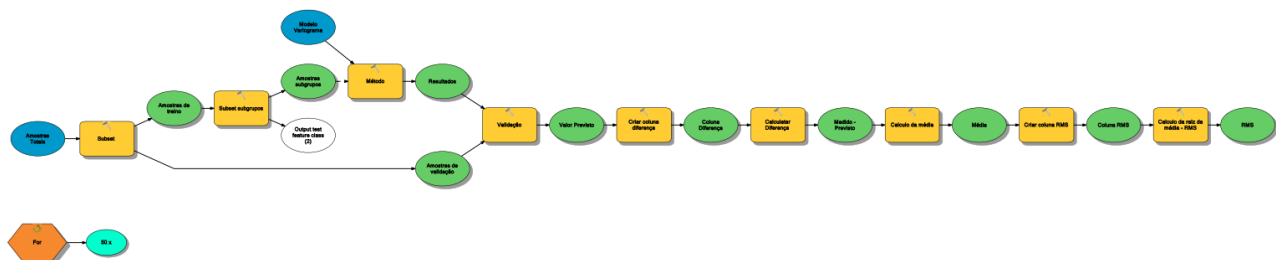


Figura 8 – Modelo criado no Model Builder.

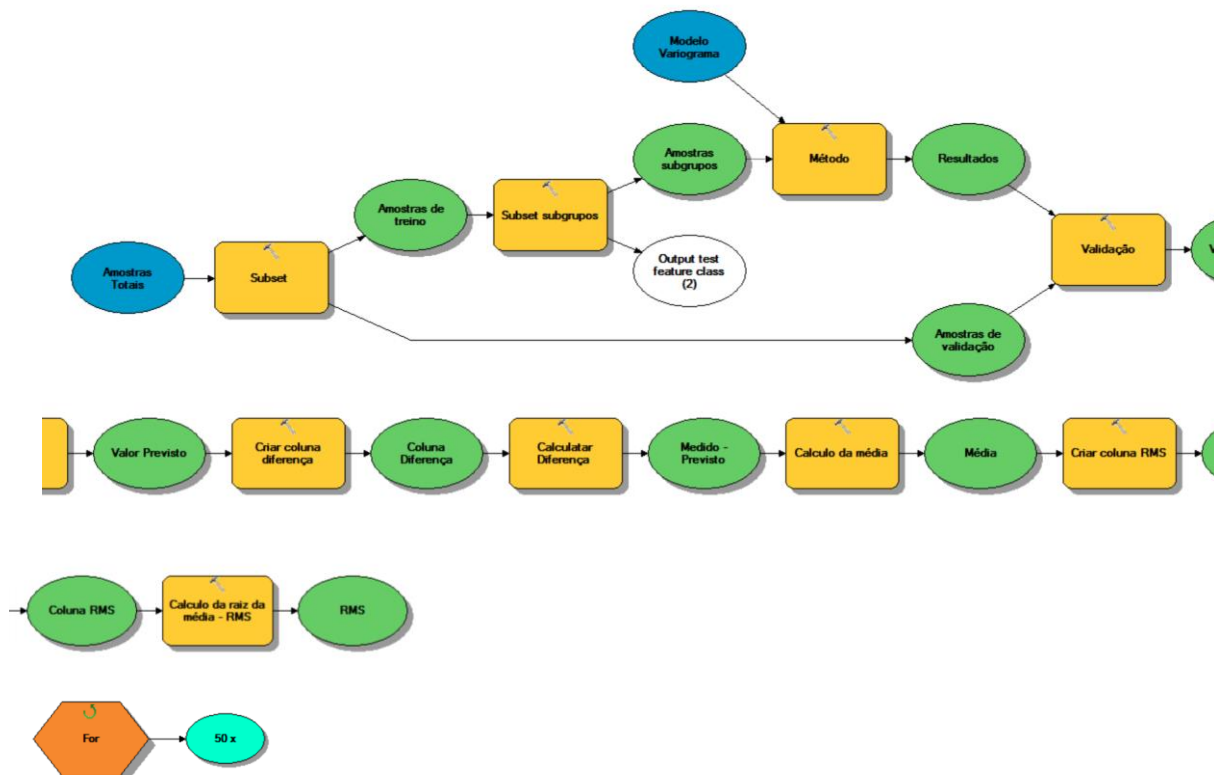


Figura 9 – Modelo criado no Model Builder (ampliação).

4.1. REPRESENTAÇÃO DA AMOSTRAGEM

Na fase exploratória dos dados representaram-se num mapa os seguintes elementos:

- Mapa Geológico de Portugal – LNEG_EN_Geology (<http://geoportal.lneg.pt/>);
- Pontos com informação dos elementos menores, óxidos maiores e índices geoquímicos (informação pré-tratada) – Anexo B;
- Limite da área em estudo;
- Delimitação do Rio Douro;
- Ocorrências minerais (adaptado de LNEG_EN_Mineral Resources (<http://geoportal.lneg.pt/>)).

Foi dada particular atenção à correta georreferenciação de todos os elementos utilizados, uma vez que estes serviram de base à produção dos mapas de anomalias geoquímicas. Utilizou-se o sistema de Coordenadas militares (Datum Lisboa Hayford-Gauss Militar).

Para avaliar o padrão de distribuição dos dados calculou-se a distância média ao vizinho mais próximo (Figura 10 e Tabela 5). Os resultados mostram que as amostras se encontram distribuídas de forma agrupada, sendo a distância entre as amostras $\approx 245\text{m}$. Este resultado pode estar influenciado pela existência de três zonas sem amostragem (Anexo C).

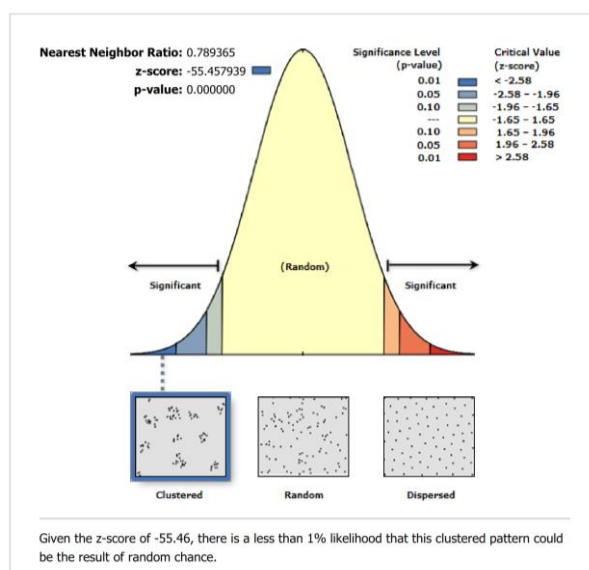


Figura 10 – Análise da distância média ao vizinho mais próximo.

Tabela 5 - Distância média ao vizinho mais próximo.

Distância média observada (m)	244.8
Distância média esperada (m)	310.2
Rácio do vizinho mais próximo	0.79

Na figura seguinte é possível observar a geologia, as ocorrências de mineralizações e a distribuição das amostras pela área de estudo (Figura 11 / Anexo D).

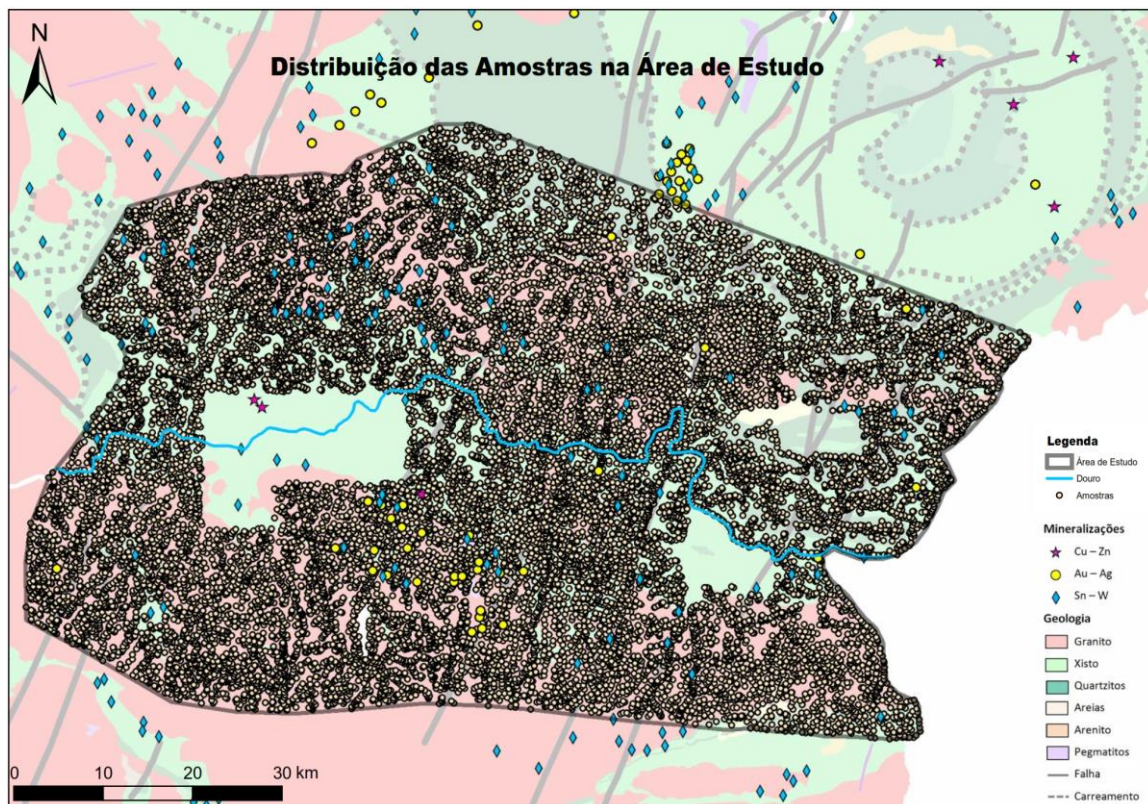


Figura 11 - Distribuição das amostras pela área de estudo.

4.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA

4.2.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA UNIVARIADA

Tratando-se de uma rede de drenagem em terrenos sílico-aluminosos, a aferição expedita da fiabilidade do banco de dados, foi confirmada através da elevada correlação inversa entre SiO_2 e Al_2O_3 (Figura 12).

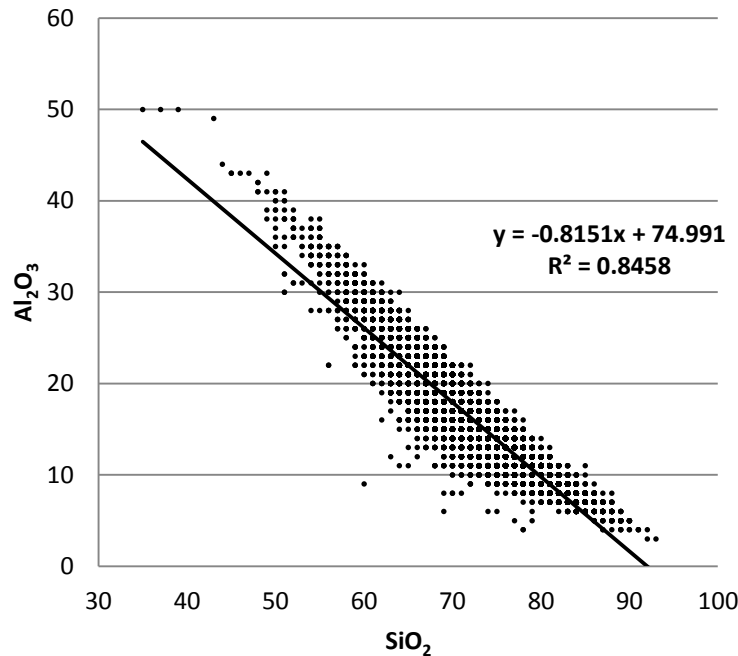


Figura 12 – Correlação entre SiO_2 e Al_2O_3 .

De forma a caracterizar os sedimentos de corrente da área em estudo, começou-se por fazer a análise estatística uni-elementar. Cada elemento estudado foi analisado em separado, tendo sido feita a análise estatística (Anexo E). Nas tabelas seguintes (Tabela 6 e Tabela 7) são apresentados algumas estatísticas referentes aos elementos analisados nos sedimentos de corrente, como a média aritmética e a mediana (parâmetros médios) e o desvio padrão e o coeficiente de variação (parâmetros de dispersão), entre outros.

Tabela 6 - Análise estatística dos sedimentos de corrente.

<i>Elemento</i>	<i>Lítio</i>	<i>Berílio</i>	<i>Boro</i>	<i>Vanádio</i>	<i>Crómio</i>	<i>Cobalto</i>	<i>Níquel</i>	<i>Cobre</i>	<i>Zinco</i>	<i>Arsénio</i>	<i>Cadmio</i>	<i>Estrôncio</i>
Símbolo	Li	Be	B	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Sr
Limite de detecção (LD) ppm	0.1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	0.4	2
Média Crusta ppm	16	1.9	11	138	135	26.6	59	27	72	2.5	0.08	320
Total Amostras	18941	18941	18941	18941	18941	18941	18941	18941	18941	18941	18941	18941
Amostras > LD	18941	4213	18941	18941	18886	18211	18907	18341	18941	14807	76	18941
Média	96.7	4.4	73.4	70.5	45.9	14.4	25.3	27.7	137.1	67.73	4.6	61.9
Mediana	83	3	57	71	39	13	22	15	129	46	1	45
Desvio-padrão	82.3	3.2	88.4	39.8	33.5	9.3	17	46.6	55.6	136.1	12.4	67.5
Coeficiente de variação	1.2	1.4	0.8	1.8	1.4	1.5	1.5	0.6	2.5	0.5	0.4	0.9
Assimetria	1	2.4	16.7	0.3	0.5	2.7	0.8	9.5	8.9	42.1	5.9	8.1
Intervalo/Amplitude	619	33	3497	351	303	228	222	1806	2786	9998	92	1821
Mínimo	1	2	3	5	3	3	3	3	18	2	1	7
Máximo	620	35	3500	356	306	231	225	1809	2804	10000	93	1828

Tabela 7 - Análise estatística dos sedimentos de corrente (continuação).

<i>Elemento</i>	<i>Ítrio</i>	<i>Zircónio</i>	<i>Nióbio</i>	<i>Molibdénio</i>	<i>Prata</i>	<i>Estanho</i>	<i>Antimónio</i>	<i>Bário</i>	<i>Lantânio</i>	<i>Tungsténio</i>	<i>Chumbo</i>	<i>Bismuto</i>
Símbolo	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Sn	Sb	Ba	La	W	Pb	Bi
Limite de detecção (LD) ppm	2	2	2	2	0.1	2	5	1	2	1	5	5
Média Crusta ppm	19	132	8	0.8	0.056	1.7	0.2	456	20	1	11	0,18
Total Amostras	18941	18941	18941	18941	18941	18941	18941	18941	18941	18941	18941	18941
Amostras > LD	15311	18941	4767	1613	18941	10517	310	18941	18941	415	16968	105
Média	30.1	218.8	15.7	3.8	0.1	9.7	17.2	264.3	74.4	2.7	23.9	12.6
Mediana	28	147	14	3	0.1	7	12	246	65	1	18	8
Desvio-padrão	18.6	222.7	9.7	1.9	0.3	17.5	19.2	167.9	45.9	54.7	53.7	13.7
Coeficiente de variação	1.6	1	1.6	2	0.4	0.6	0.9	1.6	1.6	0	0.4	0.9
Assimetria	0.7	3.1	1.7	7.8	51.2	42.2	6	1.1	4.4	81.8	38.9	4.0
Intervalo/Amplitude	184	2931	134	35	16.9	1234	204	2008	696	4999	2994	85
Mínimo	3	60	3	3	0.1	3	6	9	20	1	6	6
Máximo	187	2991	137	38	17	1237	210	2017	716	5000	3000	91

A partir da análise estatística para cada elemento pode verificar-se que:

- 17 dos 24 elementos apresentam concentrações médias superiores à média da crosta terrestre;
- No caso do Ag o LD é superior à média da crosta e no W o LD é igual à média da crosta;
- No caso do Be, Cd, Nb, Mo, Sb, W e Bi, pelo menos 50% das amostras estão abaixo do LD;
- No geral o coeficiente de variação (cv) é elevado, à exceção do tungsténio, o que evidencia teores máximos muito afastados da média. A distribuição é concentrada se $cv \leq 0.1$, e dispersa caso $cv > 0.1$;
- Todos os elementos apresentam assimetria positiva.

4.2.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA BIVARIADA

Para a análise estatística bivariada foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson (r), que quantifica a correlação entre pares de variáveis. Os coeficientes de correlação podem variar entre -1,00 e +1,00. Se $r = 1$ se existe correlação positiva, se $r = -1$ se a correlação é negativa e se $r=0$ as variáveis não estão correlacionadas.

Foi construída uma matriz de correlação entre os diversos elementos da área de estudo e por Carta Geológica quando se observaram correlações importantes (Tabela 9 / Anexo F). As células a vermelho identificam correlações **Muito Elevadas** (acima do 0,9), a laranja correlações **Elevadas** (entre 0,8 e 0,9), a amarelo correlações **Moderadas** (entre 0,7 e 0,8) e a verde correlações **Baixas** (abaixo de 0,7) – Tabela 8.

Tabela 8 – Classes de correlação utilizadas.

Correlação	Valores
Muito elevada	>0.9
Elevada	0.8-0.9
Moderada	0.7-0.8
Baixa	<0.7

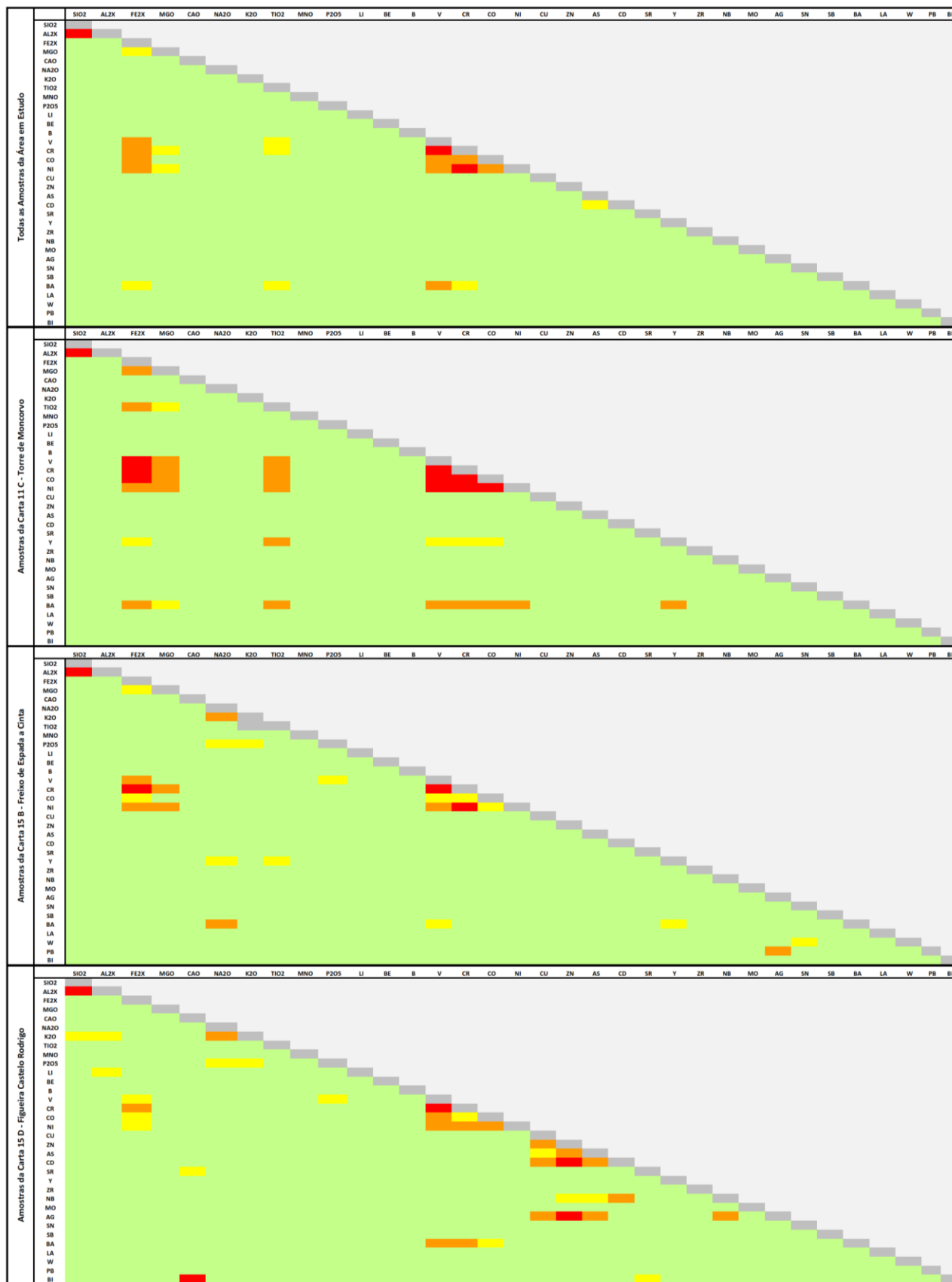


Tabela 9 – Correlação dos diversos elementos dos sedimentos de corrente na Area de estudo e por Carta Geológica.

A partir da análise da correlação entre os diversos elementos, pode verificar-se que:

- Existe uma correlação muito elevada entre o SiO_2 e o Al_2O_3 ($> -0,91$), indicador dos terrenos silício-aluminosos, essencialmente xistos, ou seja, rochas ricas em filossilicatos;
- Correlações moderadas a muito elevadas entre o Cr/Co/Ni e o V/Cr/Co ($>0,70$) – Indicador das rochas máficas e ultramáficas;
- Correlação moderadas a muito elevadas entre o V/Cr/Co/Ni e o $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ ($>0,70$) – Indicador de associações de sulfuretos;
- Na carta 15 B – Freixo de Espada a Cinta, observa-se uma correlação moderada entre o Sn e W ($>0,70$) – Indiciam enriquecimentos de estanho e/ou tungsténio;
- Na carta 15 D – Figueira de Castelo Rodrigo, observam-se correlações moderadas a muito elevadas entre o Cu/Zn/As e o Zn/As/Cd ($> 0,70$) – Indicador de associação de mineralizações de sulfuretos;
- Na carta 15 D observam-se ainda fortes correlações elevadas a muito elevadas entre o Cu/Zn/As e o Ag ($> 0,80$) – Indicadores de potenciais ocorrências de metais preciosos;

Através da análise da correlação entre os Índices e os elementos que o compõem é possível observar o seguinte:

- No caso do I_{AA} , o elemento cuja correlação com o I_{AA} é mais forte é o As (Tabela 10).

Tabela 10 – Correlação do I_{AA} com os diversos elementos que o constituem.

	AS	AG	SB	BI	I_{AA}
AS	1.00				
AG	0.17	1.00			
SB	0.01	0.00	1.00		
BI	0.21	0.20	0.02	1.00	
I_{AA}	0.51	0.12	0.13	0.20	1.00

- No caso do I_{MB} , o elemento cuja correlação com o I_{MB} é mais forte é o Zn (Tabela 11).

Tabela 11 - Correlação do I_{MB} com os diversos elementos que o constituem.

	CO	NI	CU	ZN	CD	PB	BI	I_{MB}
CO	1.00							
NI	0.88	1.00						
CU	0.31	0.36	1.00					
ZN	0.13	0.11	0.15	1.00				
CD	-0.01	-0.01	0.04	0.07	1.00			
PB	0.05	0.02	0.06	0.14	0.01	1.00		
BI	-0.06	-0.07	0.09	0.04	0.19	0.05	1.00	
I_{MB}	-0.34	-0.28	0.14	0.47	0.05	0.15	0.15	1.00

- No caso do I_{SW} , o elemento cuja correlação com o I_{SW} é mais forte é o Y (Tabela 12). Ao correlacionar o W com o I_{SW} , retirando os valores abaixo do LD, a correlação é de 0.42 (Tabela 13).

Tabela 12 - Correlação do I_{SW} com os diversos elementos que o constituem.

	Y	NB	MO	SN	W	I_{SW}
Y	1					
NB	-0.24	1.00				
MO	0.32	0.14	1.00			
SN	-0.19	0.16	0.01	1.00		
W	0.06	0.07	0.11	0.05	1.00	
I_{SW}	0.71	0.19	0.21	0.09	0.14	1.00

Tabela 13 - Correlação do I_{SW} com o W (apenas valores acima do LD).

	W	I_{SW}
W	1	
I_{SW}	0.42	1

O facto de as correlações não serem significativas pode ter várias interpretações: a inadequabilidade ou má definição dos índices geoquímicos; a existência de sinais geoquímicos com fontes geológicas/metassomáticas diversas (incluindo, possivelmente, a antropogénica) o que inviabiliza a definição dos índices com base em critérios geoquímicos e metalogenéticos únicos; a elevada sensibilidade aos dados censurados (abaixo do LD), não sendo válido para todos será sensível por exemplo para a situação do I_{SW} e I_{AA} .

4.3. INTERPOLAÇÃO ESPACIAL DOS DADOS

4.3.1. ESCOLHA DO MÉTODO E PARÂMETROS DE INTERPOLAÇÃO

De forma a perceber qual o método de interpolação mais adequado e que parâmetros de aplicação utilizar na interpolação, fizeram-se diferentes testes variando diversos parâmetros de aplicação.

Nesse sentido foram efetuados testes para dois elementos: o Cu (variável com distribuição muito assimétrica) e a SiO_2 (variável com distribuição aproximadamente normal) - Figura 13.

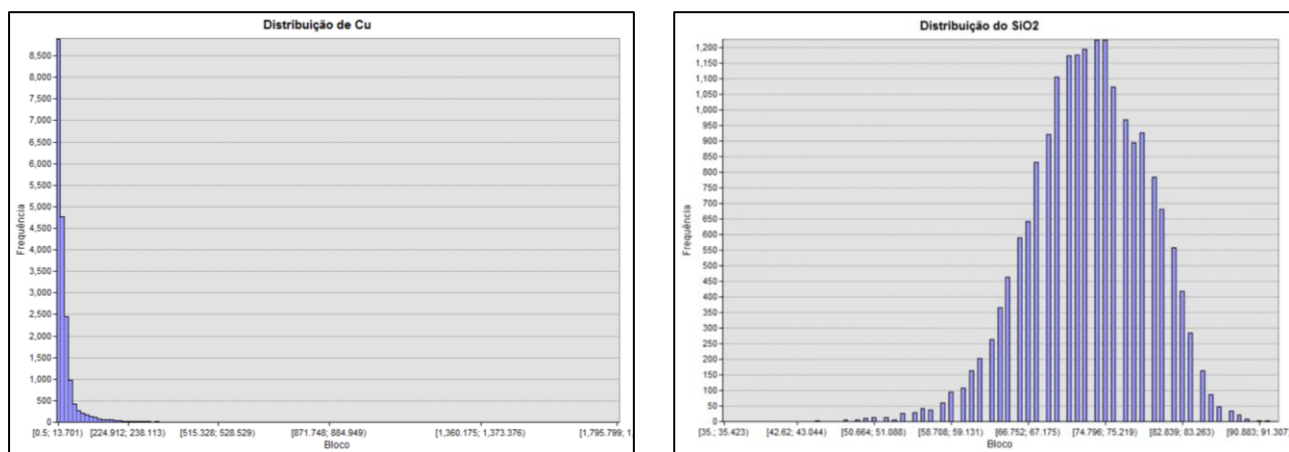


Figura 13 – Histogramas do Cu (distribuição muito assimétrica) e do SiO₂ (distribuição aproximadamente normal).

O cálculo do RMS para cada teste foi automatizado com recurso ao Model Builder de forma a repetir o procedimento para 50 amostras diferentes selecionadas aleatoriamente do conjunto original.

O ficheiro “Amostras” foi dividido inicialmente em duas partes, 80% das amostras para o grupo de treino e 20% das amostras para o grupo de validação. A partir das amostras de treino foram criados os diferentes subgrupos de treino com: 100%, 90%, 80%, 70%, 60%, 50%, 40%, 30%, 20%, 10%, 5%, 3%, 2%, 1%, 0.5% e 0.2% das amostras. Para cada subgrupo de amostras realizaram-se os diferentes testes, utilizando para isso modelos Geoestatísticos com os parâmetros definidos na Tabela 14 e Tabela 15.

O teste K_Es_20V_P21_EP26 foi realizado sem os valores outliers, valores acima de 27.5 ppm.

Foram realizados no total 15 testes, totalizando mais de 10 mil ensaios.

Tabela 14 – Parâmetros utilizados nos diferentes testes para interpolação do Cu.

Cu						
Amostras %	K_Es_5V_P770_EP1017	Idw_15V	K_Es_5V_P0.62_EP0.465	K_Es_5V_P1807_EP0	K_Es_20V_P1807_EP0	K_Es_20V_P21_EP26
Método	Krigagem	Idw	Krigagem	Krigagem	Krigagem	krigagem
Amostras	15153	15153	15153	15153	15153	13306 Sem outliers
Log	Não		Sim	Não	Não	Não
Modelo	Esférico		Esférico	Esférico	Esférico	Esférico
Patamar	771		0.62	1807	1807	21
Alcance	18265		20062	15648	15648	18276
Efeito Pepita	1017		0.47	0	0	26,25
Vizinhos Max/Min	5/2	15/10	5/2	5/2	20/20	20/20

Tabela 15 - Parâmetros utilizados nos diferentes testes para interpolação do SiO₂

SiO ₂									
Amostras %	k_Es_20V_P12_EP14	ldw_15V	K_Es_5V_P12_EP14	ldw_20V	K_Es_50V_P12_EP14	ldw_20V_PO	K_SM_20V_EP14	K_Es_20V_P22_EP0	K_SM_200V_EP14
Método	Krigagem	ldw	Krigagem	ldw	Krigagem	ldw	Krigagem	Krigagem	Krigagem
Amostras	15153		15153		15153		15153	15153	15153
Log	Não		Não		Não		Não	Não	Não
Modelo	Esférico		Esférico		Esférico		Sem Modelo = Efeito Pepita Puro	Esférico	Sem Modelo = Efeito Pepita Puro
Patamar	12.88		12.88		12.88			22.88	
Alcance	6680		6680		6680			517	
Efeito Pepita	14		14		14		14	0	14
Vizinhos Max/Min	20/20	15/10	5/5	20/20	50/50	20/20	20/20	20/20	200/200
Potencia Otimizada						1.32			

Na Tabela 16 é possível observar a mediana do RMS para os diferentes testes realizados para o Cu (no Anexo G encontra-se a informação referente a todos os testes realizados para o Cu e representação gráfica dos mesmos).

Tabela 16 – Mediana do valor do RMS obtido nos testes realizados para o Cu.

Cu						
Amostras %	K_Es_5V_P770_EP1017	ldw_15V	K_Es_5V_P0.62_EP0.465	K_Es_5V_P1807_EP0	K_Es_20V_P1807_EP0	K_Es_20V_P21_EP26
	RMS	RMS	RMS	RMS	RMS	RMS
100	36.69	37.25		37.94		35.18
90	36.61	36.49		39.44		36.45
80	37.35	37.59		37.14		35.79
70	39.19	37.65		37.17		35.65
60	38.26	38.79		38.32		37.80
50	37.73	38.79	36.98	38.35	36.75	36.11
40	39.18	39.51		38.94		36.19
30	38.23	38.19		38.51		36.30
20	38.48	38.41		39.25	36.82	38.20
10	40.31	39.98	38.19	40.74	39.12	38.18
5	38.89	40.75		41.18	39.25	38.92
3	42.42	41.39		40.14	39.27	38.21
2	41.12	41.34		40.89	38.77	39.94
1	41.82	43.50	41.90	42.11	42.56	40.42
0.5	42.90	42.58		43.79	42.76	40.99
0.2				45.83	45.00	45.91

Nos gráficos seguintes (Figura 14 e Figura 15) é possível observar a variação do RMS do Cu nos diferentes testes realizados.

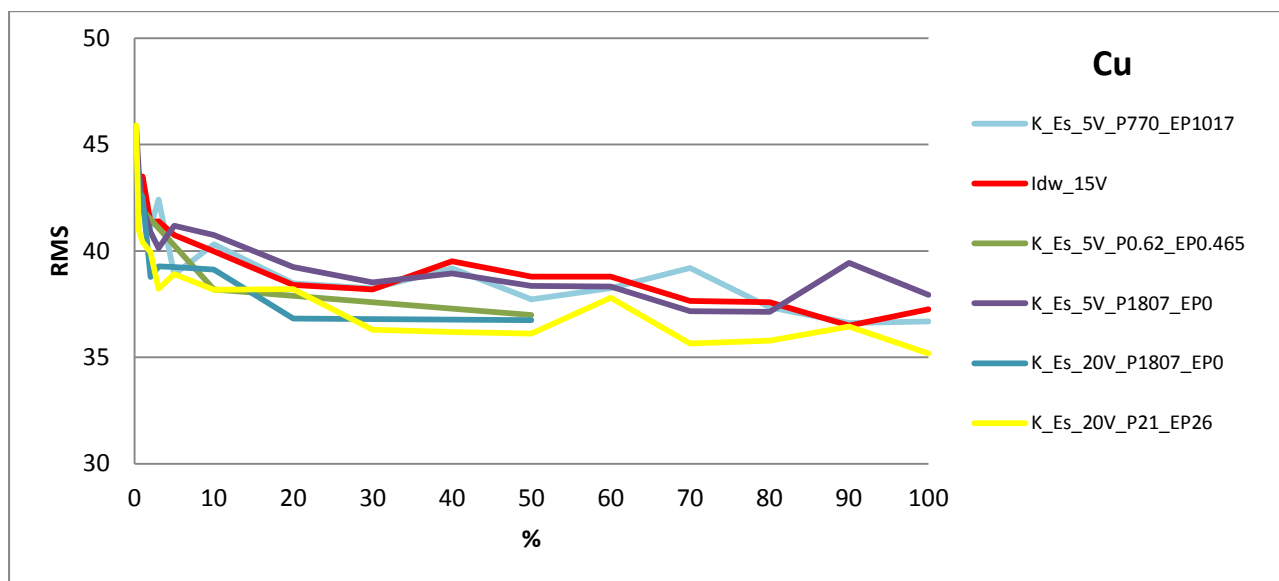


Figura 14 - Testes realizados para o Cu.

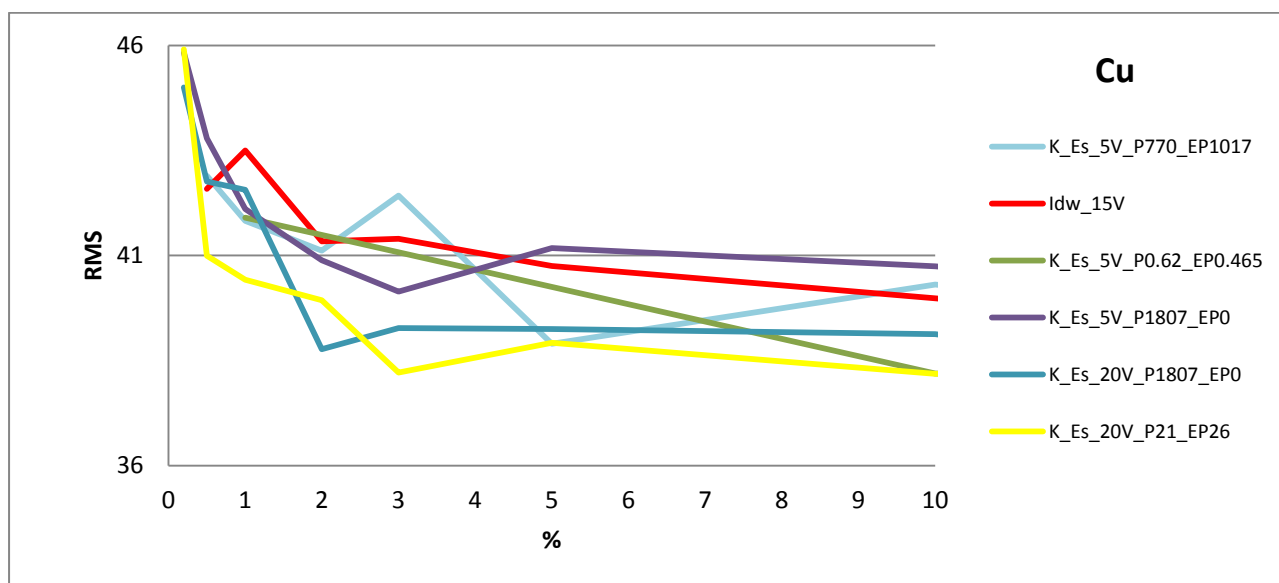


Figura 15 - Testes realizados para o Cu (ampliação da zona inicial do gráfico).

O erro é na generalidade elevado e independente da densidade de amostragem. A qualidade da interpolação só se degrada quando a distância entre amostras é superior a 1km (valor exato 1318m - subgrupo 5% - Anexo C).

Os resultados dos testes são semelhantes, embora no caso da krigagem com modelo esférico, 20 vizinhos, patamar =21 e efeito de pepita =26 (ensaio realizado sem os outliers do Cu), o erro é marginalmente inferior. Os resultados dos testes realizados com o idw e com a krigagem não são significativamente diferentes.

Na Tabela 17 é possível observar a mediana do RMS para os diferentes testes realizados para o SiO₂ (no Anexo H encontra-se a informação referente a todos os testes realizados para o SiO₂ e representação gráfica dos mesmos).

Tabela 17 – Mediana do valor do RMS obtido nos testes realizados para o SiO₂.

SiO ₂									
Amostras %	k_Es_20V_P12_EP14	ldw_15V	K_Es_5V_P12_EP14	ldw_20V	K_Es_50V_P12_EP14	ldw_20V_P12_O	K_SM_20V_EP14	K_Es_20V_P22_EP0	K_SM_200V_EP14
	RMS	RMS	RMS	RMS	RMS	RMS	RMS	RMS	RMS
100	3.94	3.99	4.05	3.99	3.92	3.91	4.05	4.03	4.56
90	3.95	4.03	4.04	4.01	3.93	3.91	4.07	4.05	4.59
80	3.99	4.11	4.09	4.02	3.99	3.95	4.10	4.07	4.64
70	4.02	4.05	4.10	4.07	4.00	3.96	4.13	4.09	4.63
60	4.03	4.12	4.14	4.09	4.03	4.02	4.16	4.12	4.70
50	4.08	4.20	4.18	4.15	4.08	4.04	4.20	4.17	4.73
40	4.11	4.22	4.23	4.21	4.11	4.11	4.26	4.23	4.82
30	4.18	4.28	4.31	4.30	4.17	4.18	4.35	4.29	4.91
20	4.29	4.40	4.39	4.38	4.26	4.31	4.48	4.42	5.03
10	4.44	4.57	4.57	4.54	4.47	4.49	4.65	4.62	5.25
5	4.65	4.74	4.76	4.74	4.67	4.66	4.88	4.86	5.50
3	4.81	4.91	4.93	4.91	4.80	4.79	5.01	5.00	5.61
2	4.96	4.99	5.01	5.05	4.97	4.92	5.17	5.15	5.77
1	5.15	5.25	5.25	5.22	5.23	5.12	5.33	5.36	6.17
0.5	5.41	5.48	5.48	5.45	5.54	5.34	5.62	5.57	6.18
0.2	5.76	5.77	5.78	5.77	6.09	5.64	5.90	5.85	6.22

Nos gráficos seguintes (Figura 16 a Figura 19) é possível observar a variação do RMS do SiO₂ nos diferentes testes realizados.

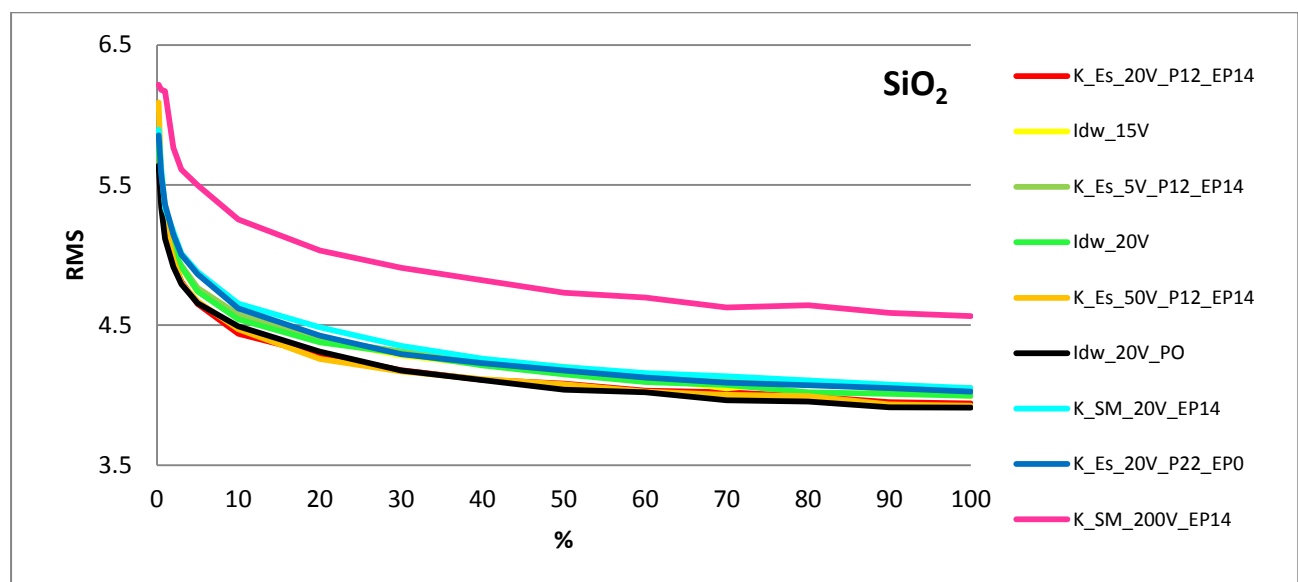


Figura 16 – Testes realizados para o SiO₂.

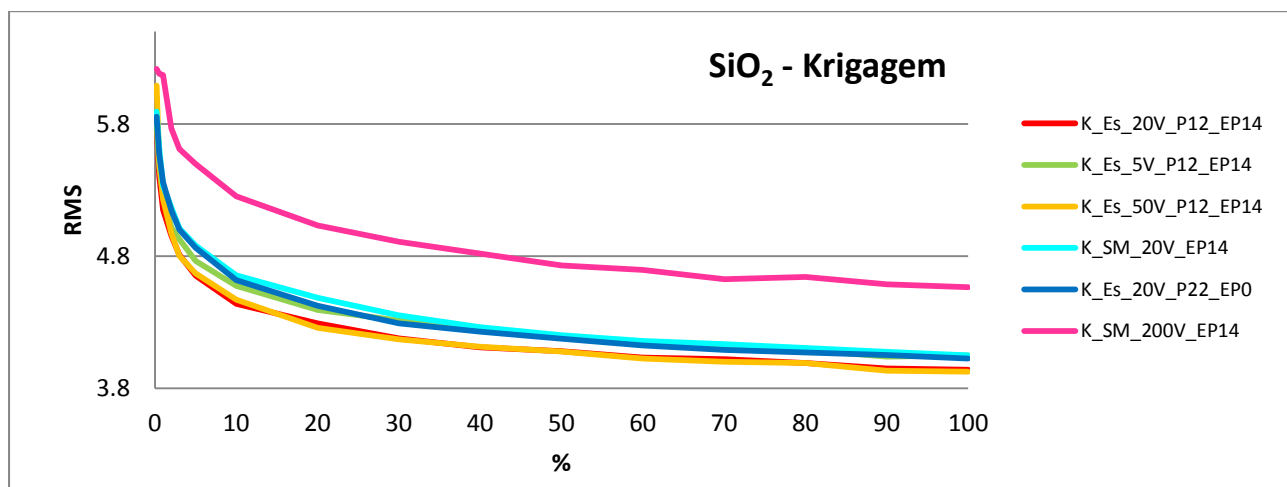


Figura 17 - Testes realizados para o SiO₂ – Krigagem.

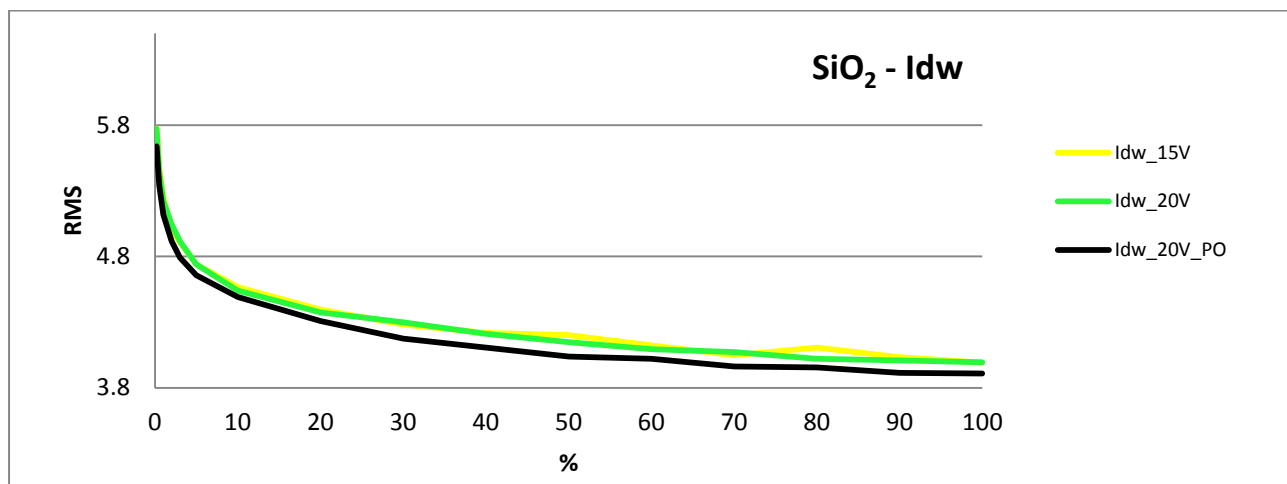


Figura 18 - Testes realizados para o SiO₂ – IDW.

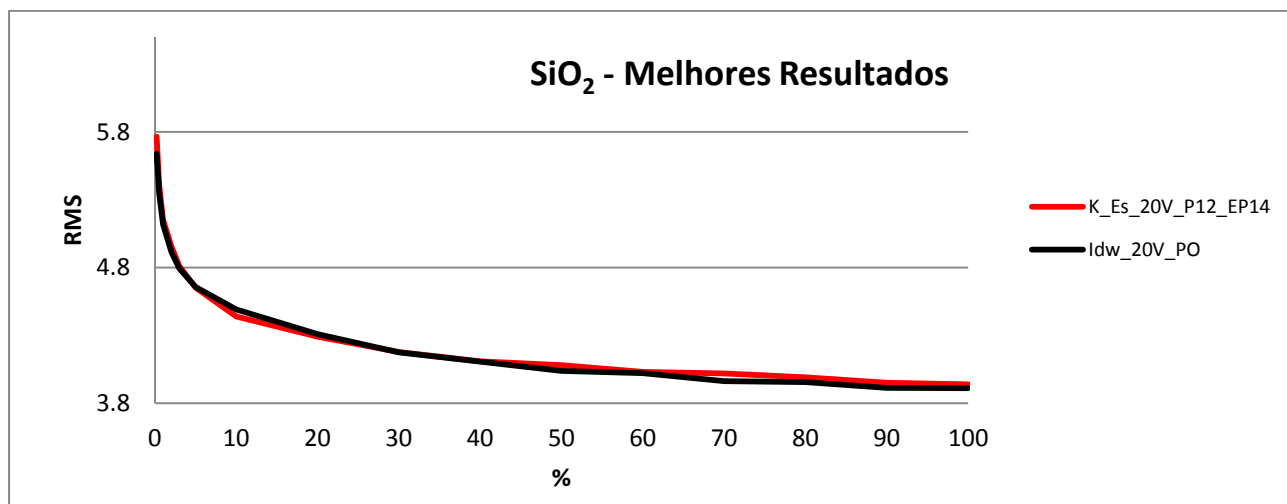


Figura 19 – Melhores resultados obtidos para o SiO₂.

A interpolação do SiO_2 dá resultados bastante satisfatórios. A qualidade da interpolação degrada-se de forma contínua, sendo mais expressiva quando a distância entre amostras é cerca de 1km (valor exato 915.8m - subgrupo 10% - Anexo C).

Os resultados obtidos com o melhor modelo de krigagem e o modelo de Idw com potência otimizada são virtualmente idênticos.

Após a realização dos testes para o Cu e SiO_2 , podemos observar que:

- A krigagem com 20 vizinhos e com 50 vizinhos apresentam os menores erros (RMS) relativamente aos restantes testes;
- Na krigagem com 200 vizinhos o RMS tende para o desvio padrão;
- O idw com potência otimizada dá resultados bastante satisfatórios uma vez que apresenta os menores erros;
- No Cu, que é uma variável com distribuição muito assimétrica, a média dos valores de RMS é semelhante ao desvio padrão (46,6);
- O SiO_2 é uma variável com distribuição aproximadamente normal, onde a média de valores de RMS é menor que o desvio padrão.

Podemos assim concluir que para a elaboração dos diferentes mapas geoquímicos se deve utilizar:

- Krigagem:
 - Sem transformação logarítmica;
 - Patamar = variância;
 - Com 20 vizinhos, 1 sector;
 - O efeito de pepita e alcance são calculados automaticamente.
- Idw:
 - Com potência otimizada;
 - Com 20 vizinhos.

A partir destes modelos e dos diversos elementos e índices geoquímicos, realizamos a interpolação para a área em estudo.

4.4. MAPAS GEOQUIMICOS

Foram elaborados os mapas geoquímicos dos 3 índices estudados: Tungstênio e Estanho (I_{SW}), Metais Básicos (I_{MB}) e Metais preciosos (I_{AA}). Elaboraram-se ainda os mapas geoquímicos dos elementos principais dos índices geoquímicos: Cu, Zn, W, Sn, Ag, As e Sb. Por fim fez-se a cokrigagem entre os Índices Geoquímicos e os principais elementos que os compõem: W- I_{SW} , Ag- I_{AA} e Cu- I_{MB} . A cokrigagem permite estimar variáveis primárias a partir dos índices geoquímicos. Todos os mapas geoquímicos elaborados se encontram no Anexo J.

Os valores dos diferentes parâmetros utilizados na aplicação da krigagem e inverso da distância encontram-se na Tabela 18. Os resultados obtidos estão condicionados pelos métodos analíticos utilizados, em particular no caso do W e Ag.

A partir dos mapas geoquímicos da krigagem, retiraram-se as tabelas dos valores observados/ valores estimados, para avaliar a qualidade da interpolação - R^2 (Tabela 18). O R^2 varia entre 0 e 1 (ajuste perfeito) e permite determinar a dependência entre as variáveis. Todos os cálculos para determinar a qualidade de ajustamento dos elementos e índices geoquímicos e respetiva representação gráfica entre os valores observados e os valores estimados encontram-se no Anexo I.

Tabela 18 – Parametros utilizados no idw e krigagem e qualidade da interpolação para os elementos e índices geoquímicos estudados.

Elemento/ Índice		Cu	Zn	W	Sn	Ag	As	Sb	I_{SW}	I_{MB}	I_{AA}	SiO ₂
IDW	Potência	1	1,188	2	1.66	1.68	1.66	1	1.22	1.08	1.285	1.11
	Vizinhos Max/Min	20/20	20/20	20/20	20/20	20/20	20/20	20/20	20/20	20/20	20/20	20/20
	RMS	37.18	43.99	62.74	13.12	0.28	91.55	2.92	6.31	6.67	8.52	3.89
Krigagem	Modelo	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico
	Efeito Pepita	1017.13	1908.24	408.957	398.78	0.055	10990.5	7.24	49.86	59.23	90.76	11.24
	Alcance	18265	20738	9449	14090	12000	8475	16430	14198	18656	12747	48000
	Patamar	2172.29	3093.09	2991.32	304.819	0.07	18515.9	368.1	111.62	148.56	150.07	37.73
	Lag size	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
	Vizinhos Max/Min	20/20	20/20	20/20	20/20	20/20	20/20	20/20	20/20	20/20	20/20	20/20
	RMS	37.14	44.02	58.64	12.72	0.262	103.93	3.08	6.29	6.67	8.55	3.93
Qualidade da interpolação	Média	27.10	137.21	2.74	5.88	0.11	52.95	1.28	19.65	38.70	11.58	73.32
	SQ t	4.00E+07	5.82E+07	5.67E+07	3.54E+06	1.24E+03	2.86E+08	1.92E+05	2.09E+06	2.77E+06	2.86E+06	7.04E+05
	SQ e	1.56E+07	2.14E+07	1.09E+07	7.21E+05	9.85E+01	7.26E+07	7.88E+04	1.29E+06	1.82E+06	1.41E+06	4.04E+05
	SQ d	2.58E+07	3.62E+07	6.42E+07	3.02E+06	1.28E+03	2.02E+08	1.77E+05	7.39E+05	8.30E+05	1.36E+06	2.88E+05
	R^2	0.39	0.37	0.19	0.20	0.08	0.25	0.41	0.62	0.66	0.49	0.57

Como era de esperar, a qualidade de ajuste dos Índices Geoquímicos é superior à qualidade de ajuste dos elementos que os constituem. Os índices geoquímicos procuram condensar a informação de natureza mineralógica e geoquímica quando os elementos que os constituem apresentam um elevado número de amostras abaixo do limite de deteção.

Na Tabela 19 encontram-se os diferentes parâmetros utilizados para executar os mapas da cokrigagem entre os índices geoquímicos e os principais elementos que os constituem. Nota: No caso do Ag-I_{AA} só se consideraram 5 vizinhos pois ao usar valores muito distantes as anomalias atenuam-se.

Tabela 19 – Parametros utilizados na cokrigagem.

Elemento/ Índice		W-I _{SW}	Ag-I _{AA}	Cu-I _{MB}
Krigagem	Modelo	Esférico	Esférico	Esférico
	Efeito Pepita	0	0	1923.4
	Alcance	531	1721	18442
	Patamar	477.6	0.07	726.9
	Lag size	300	1000	6000
	Vizinhos Max/Min	20/20	5/5	20/20
	RMS	62.52	0.314	37.36

4.4.1. ÍNDICE DO TUNGSTÊNIO E ESTANHO (I_{SW})

O tungsténio apresenta reduzida variação de teor relativamente ao substrato litológico, mas é nos granitos, seguido dos xistos, onde se observam valores de concentração mais elevados. As mineralizações mais comuns são as filonianas e alguns pegmatitos contendo fases portadoras de Sn e/ou W associadas a granitos; depósitos do tipo skarn com scheelite-volframite correspondem a níveis calcossilitados do CXG ou níveis particulares em sequências do Silúrico sujeitos a metassomatismo, geralmente induzido pelo contacto com intrusões graníticas. O Sn e o W aparecem, por isso, naturalmente associados. O mapa geoquímico do tungsténio (Figura 20 e Figura 21) permite observar que a distribuição é bastante heterogénea, observando-se algumas anomalias de elevados teores possivelmente correspondentes a mineralizações pontuais, na proximidade de ocorrências minerais documentadas e/ou escombrelas de antigas explorações mineiras ou associados a diferentes “blocos” bordejados pelas principais zonas de falha tardi-D3.

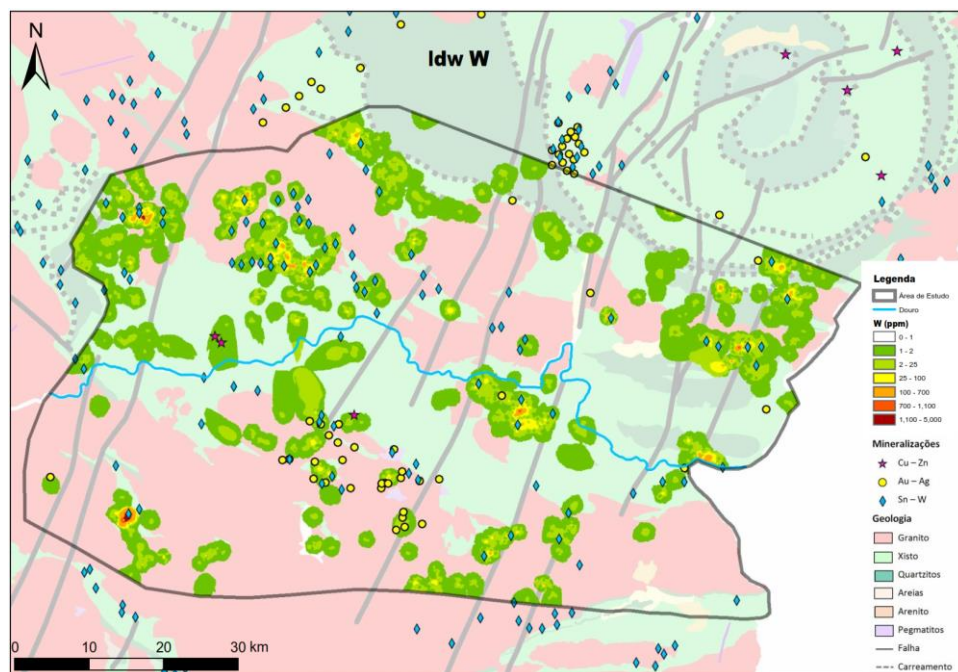


Figura 20 - Mapas geoquímicos do tungstênio pelo método idw.

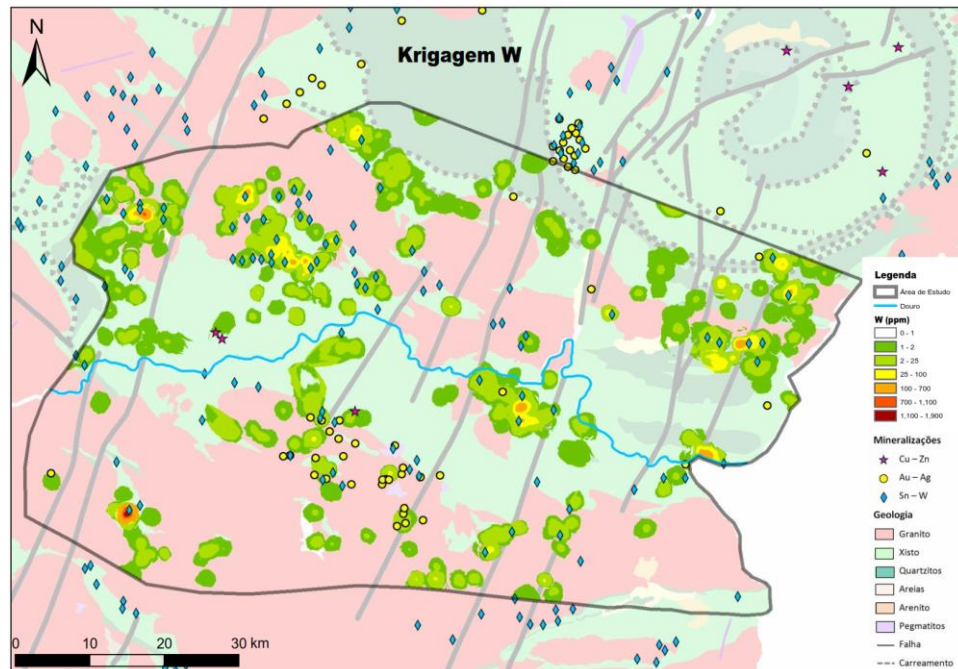


Figura 21 - Mapas geoquímicos do tungstênio pelo método krigagem.

A distribuição do Sn (Figura 22 e Figura 23) é mais homogênea, mapeando os granitos de forma quase perfeita, observando-se ainda algumas anomalias pontuais com elevada concentração.

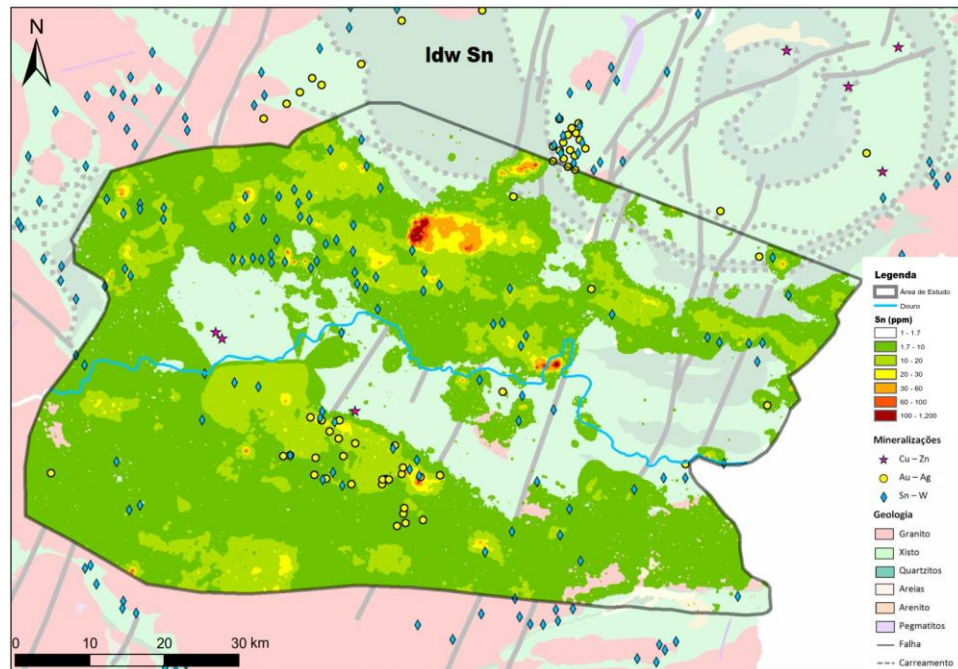


Figura 22 - Mapa geoquímico do estanho pelo método idw.

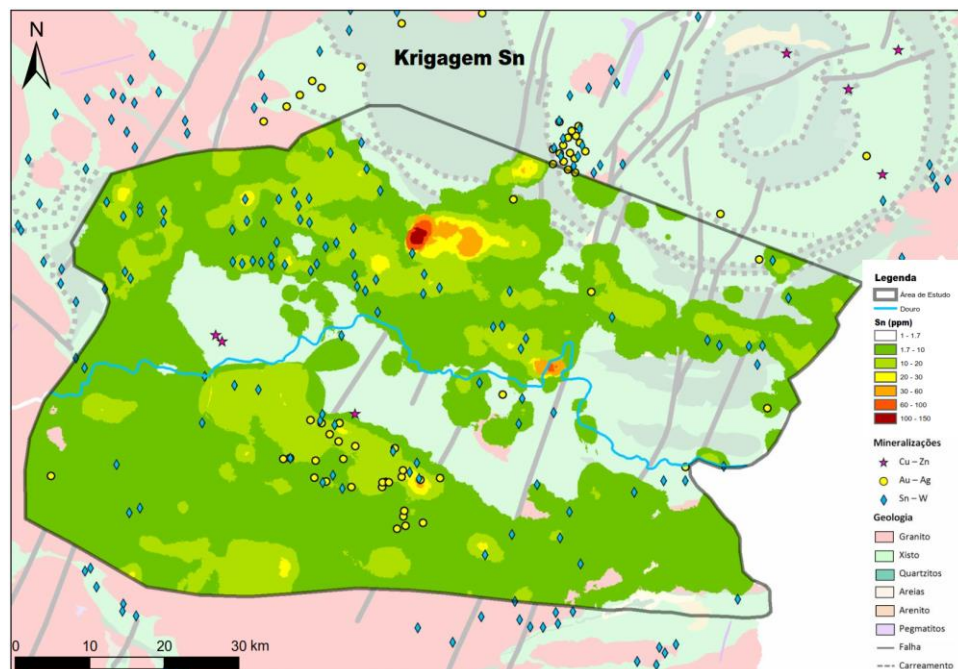


Figura 23 - Mapa geoquímico do estanho pelo método krigagem.

O Índice de Estanho e Tungstênio (I_{SW}) quando é superior a 20 delimita áreas potenciais, especialmente se as mesmas envolverem domínios com $I_{SW} > 30$. Os valores mais elevados observam-se na região envolvente de Torre de Moncorvo e em áreas adjacentes a antigas explorações mineiras de Sn e/ou W (Figura 24 e Figura 25).

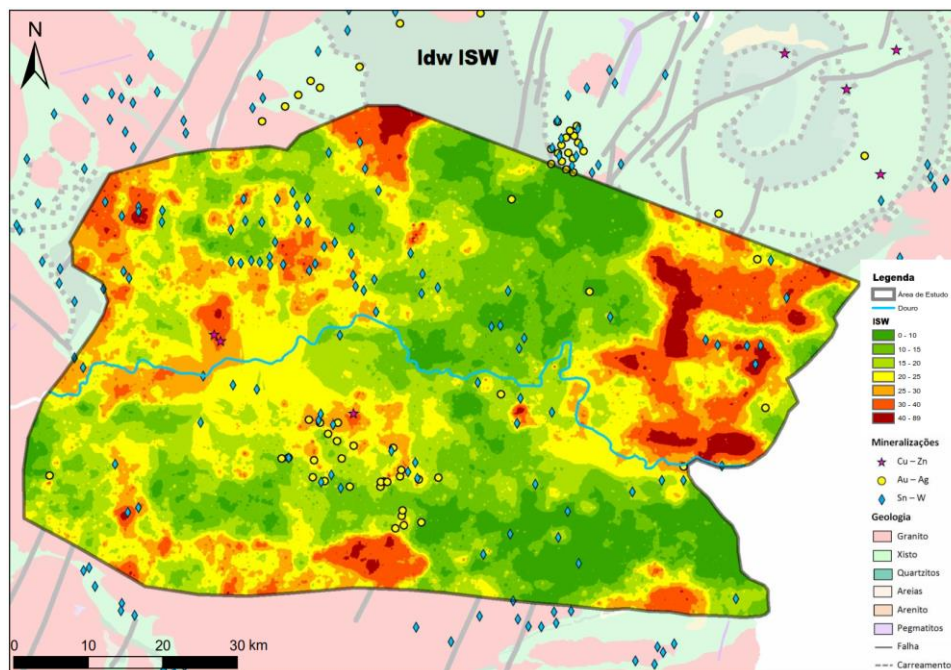


Figura 24 - Mapa geoquímico do índice do tungstênio e cassiterite (I_{SW}) pelo método idw.

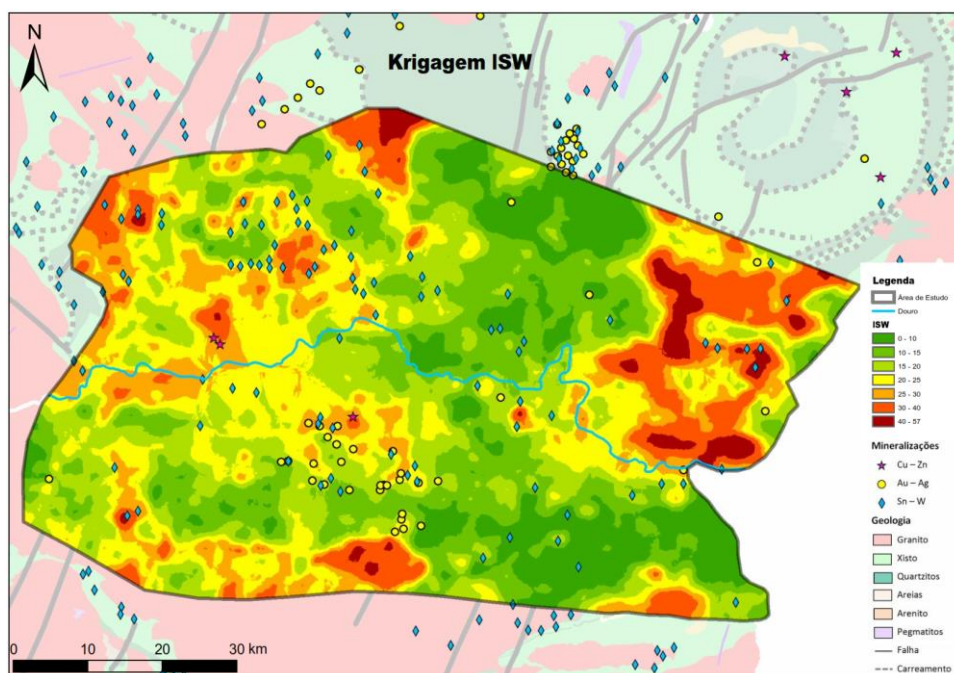


Figura 25 - Mapa geoquímico do índice do tungstênio e cassiterite (I_{SW}) pelo método krigagem.

Fazendo a cokrigagem entre o W e o I_{SW} (Figura 26), obtemos um mapa geoquímico mais completo que o mapa do W, ou seja, o índice ajuda a estimar valores de W para os locais em que não existem esses valores. Contudo estes resultados devem ser considerados com alguma precaução uma vez que se observou uma baixa correlação entre o I_{SW} e W, devido à elevada frequência de valores de W abaixo do LD.

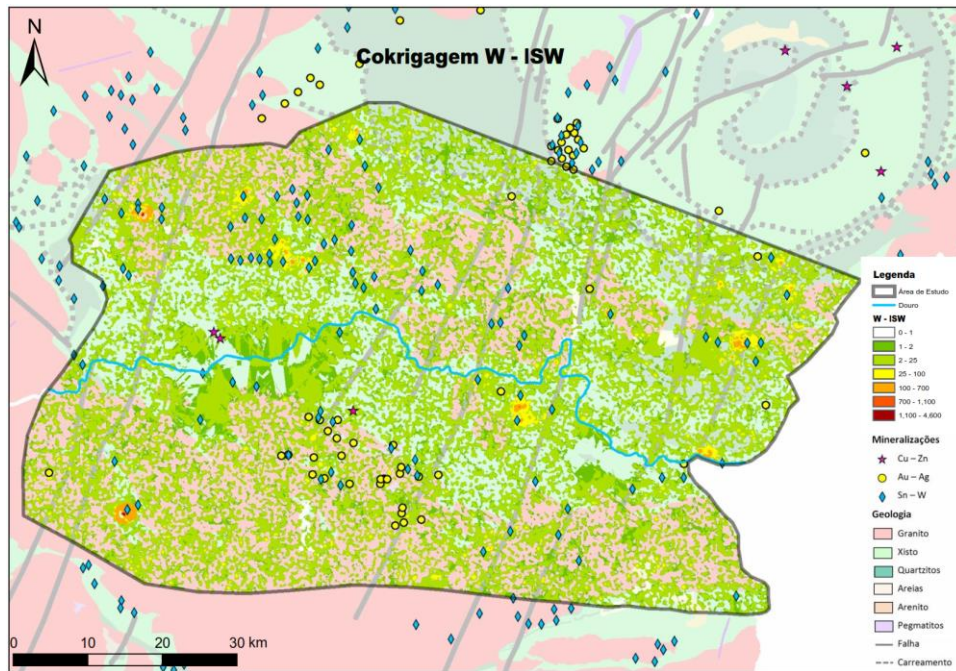


Figura 26 - Mapa geoquímico da cokrigagem do W com os I_{SW} .

Os resultados obtidos estão de acordo com o esperado, tendo em conta que ZCI é considerada uma província metalogénica de Estanho e Tungsténio. Observam-se ainda anomalias pontuais na proximidade de ocorrências minerais documentadas e/ou escombreyas de antigas explorações mineiras, anomalias pontuais correspondentes a mineralizações ou nas bordaduras das principais zonas de falha tardi-D3.

4.4.2. ÍNDICE DOS METAIS BÁSICOS (I_{MB})

As rochas que apresentam teores mais elevados de Zn, Cu, Ni, Nb, Cd e Co na crusta são os argilitos, xistos e rochas máficas. Na ZCI os sedimentos de corrente apresentam teores elevados relacionados a ocorrências de metais base e metais preciosos, em sulfuretos ou em filões, em skarns ou relacionados à existência de ocorrências minerais documentadas e/ou escombreyas de antigas explorações mineiras. O Índice dos metais básicos (I_{MB}) permite-nos assim identificar zonas ricas em sulfuretos, associadas a mineralizações de Sn/W ou de Au/Ag.

Fazendo os mapas geoquímicos do Cu (Figura 27 e Figura 28) observamos que os teores mais elevados se encontram nos xistos, e junto às margens do rio Douro, possivelmente relacionados com a atividade antropogénica da plantação da vinha. Nos mapas do Zn (Figura 29 e Figura 30) observamos que não existe correspondência entre teor e tipo litológico. O Zn parece definir faixas com a direção NNW-SSE, associadas às zonas de falhas.

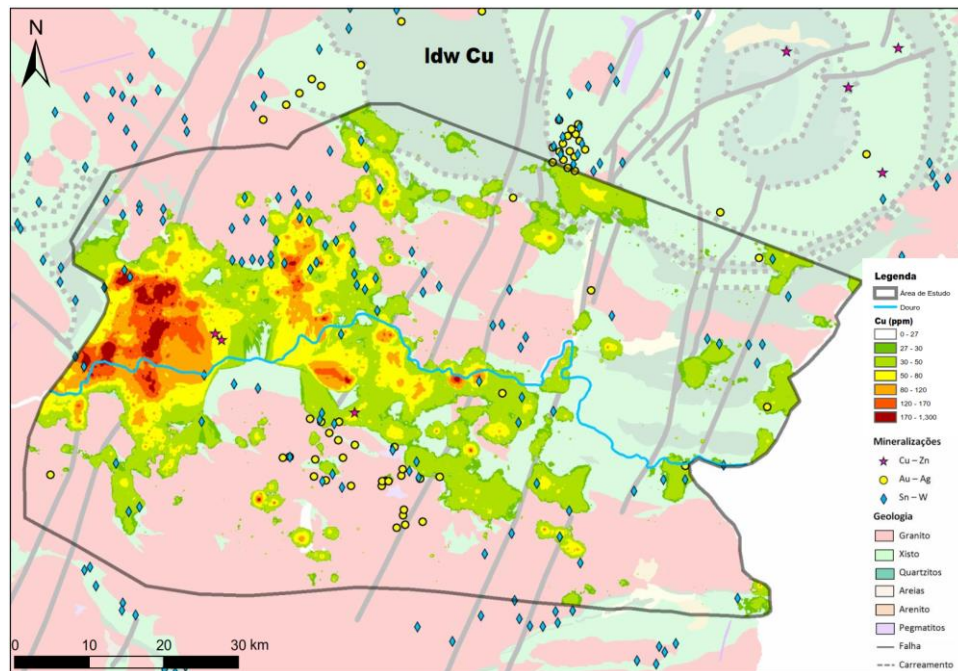


Figura 27 - Mapa geoquímico do cobre pelo método idw.

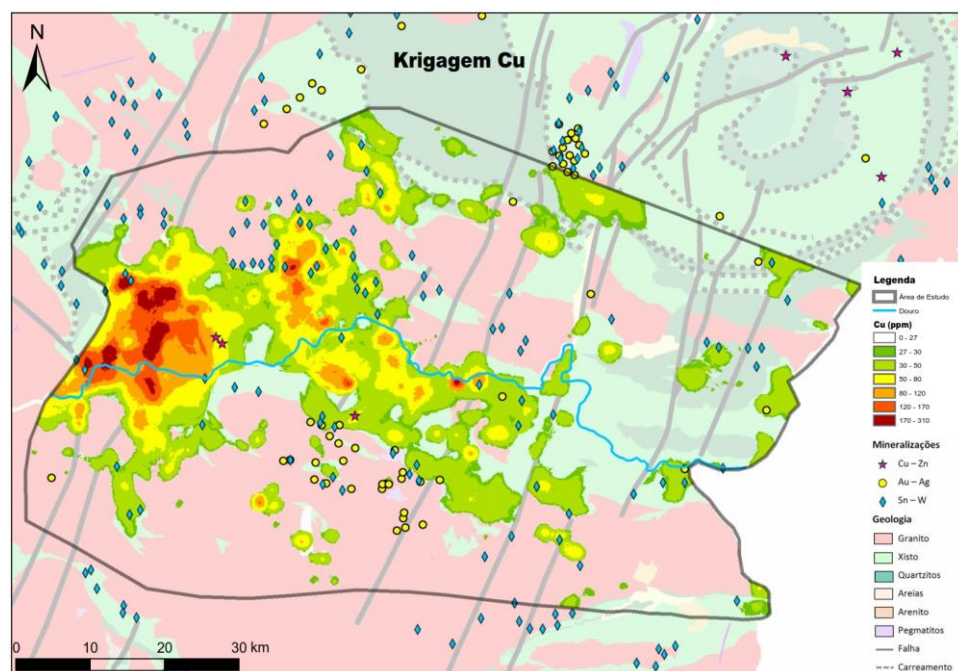


Figura 28 - Mapa geoquímico do cobre pelo método krigagem.

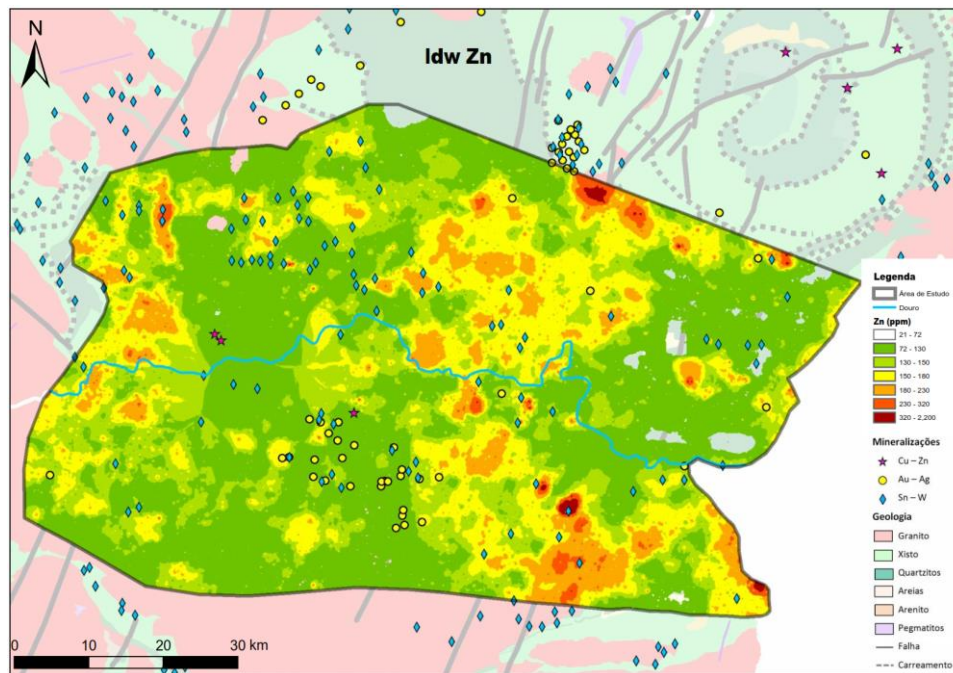


Figura 29 - Mapa geoquímico do zinco pelo método idw.

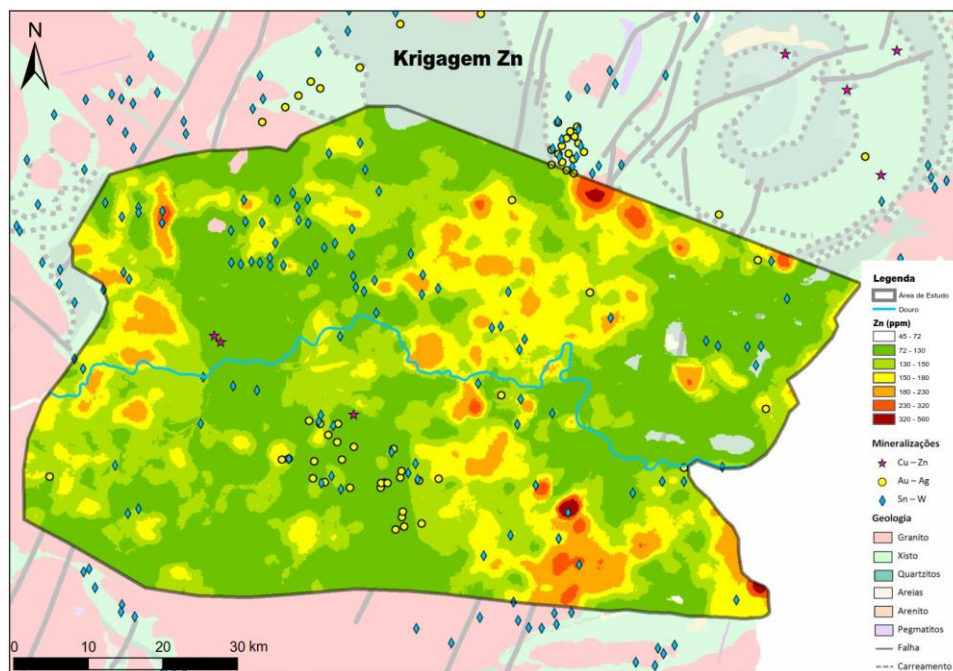


Figura 30 - Mapa geoquímico do zinco pelo método krigagem.

O Índice dos Metais Básicos (I_{MB}) quando é superior a 40 delimita áreas potenciais, embora os sectores de maior importância apresentem $I_{MB} > 50$. Os teores mais elevados ocorrem em domínios em que os diferentes metais básicos concorrem no mesmo local e na proximidade das zonas de falha (Figura 31 e Figura 32).

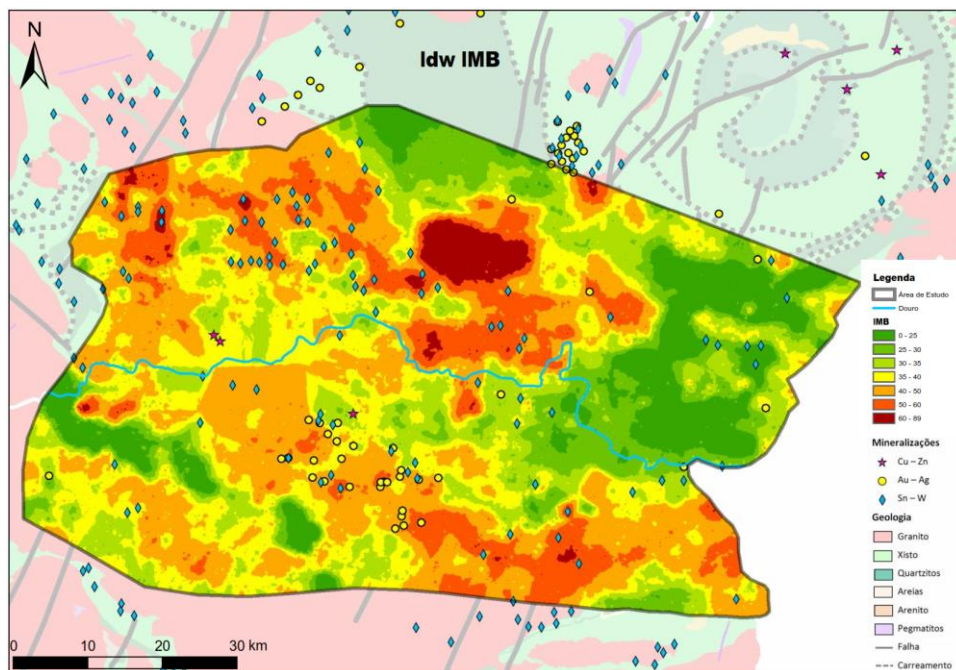


Figura 31 - Mapa geoquímico do Índice dos Sulfuretos (IMB) pelo método idw.

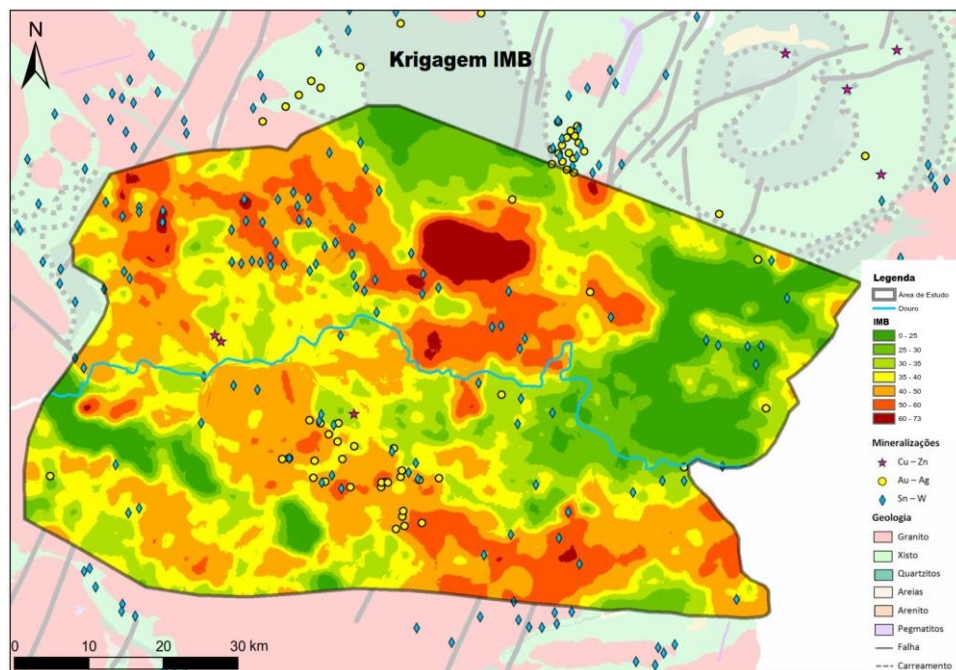


Figura 32 - Mapa geoquímico do Índice dos Sulfuretos (I_{MB}) pelo método krigagem.

O mapa geoquímico resultante da cokrigagem entre o Cu e o I_{MB} (Figura 33) é semelhante ao mapa do Cu. Nesta situação a cokrigagem não acrescenta informação relevante ao elemento. O sinal do Cu (possivelmente resultante da atividade antropogénica) sobrepõe-se ao sinal dos restantes elementos que compõem o I_{MB} .

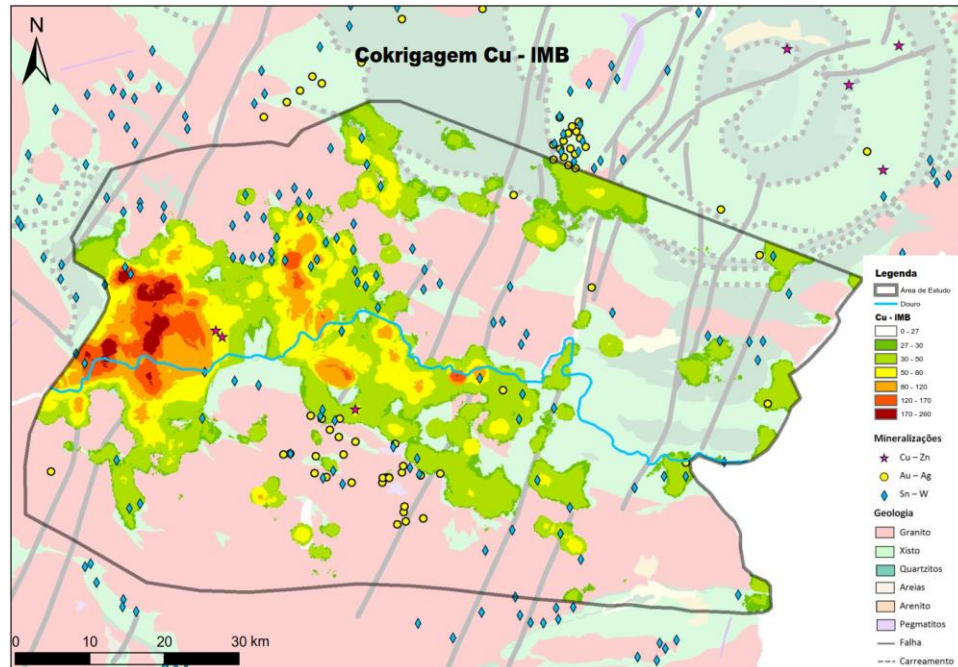


Figura 33 - Mapa geoquímico da cokrigagem entre o Cu e o I_{MB} .

4.4.3. ÍNDICE DOS METAIS PRECIOSOS (I_{AA})

Os elementos Au, Ag, As, Sb e Bi, encontram-se na natureza geralmente associados, e são bons indicadores de depósitos de metais preciosos. Na ZCI tem, com frequência, uma assinatura geoquímica com teores elevados em Ag, o qual se associa com frequência ao Au em filões hidrotermais quartzosos com sulfuretos. A distribuição de teores mais elevados em As é dispersa nos granitos e xistos, podendo estar ligados a ocorrências minerais documentadas e/ou escombreliras de antigas explorações mineiras. No entanto, os domínios locais ricos em Ag parecem claramente alinhar-se segundo as falhas NNE-SSW.

Os mapas geoquímicos da Prata - Ag (Figura 34 e Figura 35) permitem observar anomalias pontuais que podem estar relacionadas a filões hidrotermais quartzosos com sulfuretos e/ou antigas explorações mineiras e no alinhamento de falhas.

A concentração média da crosta terrestre do Ag é de 0.05, uma vez que o LD do Ag é 0.1, na representação do mapa geoquímico do Ag são representados apenas os valores superiores a 0.1.

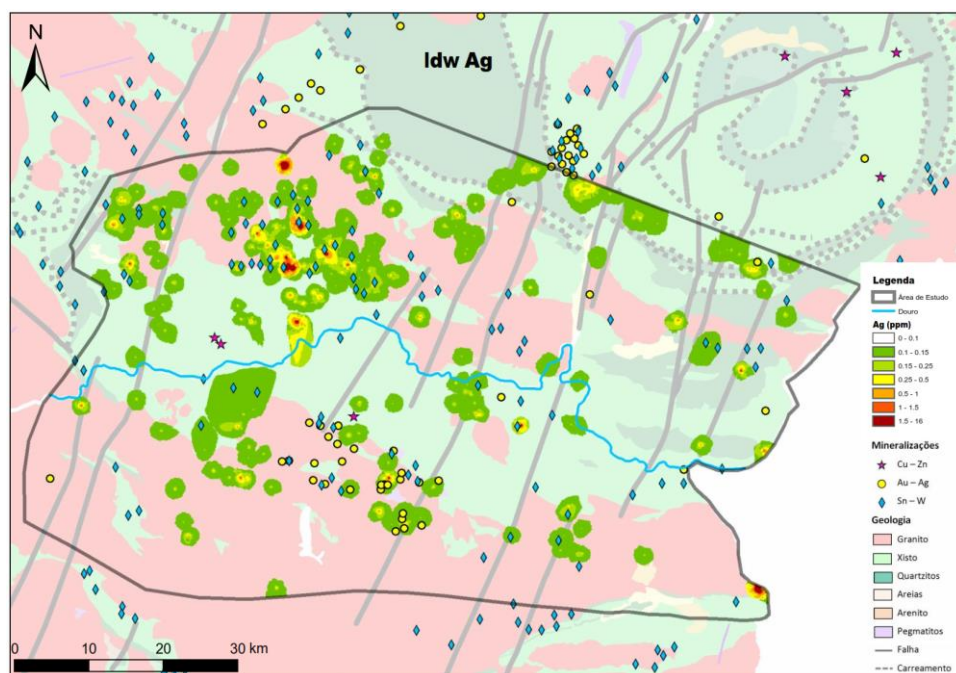


Figura 34 - Mapa geoquímico da prata pelo método Idw.

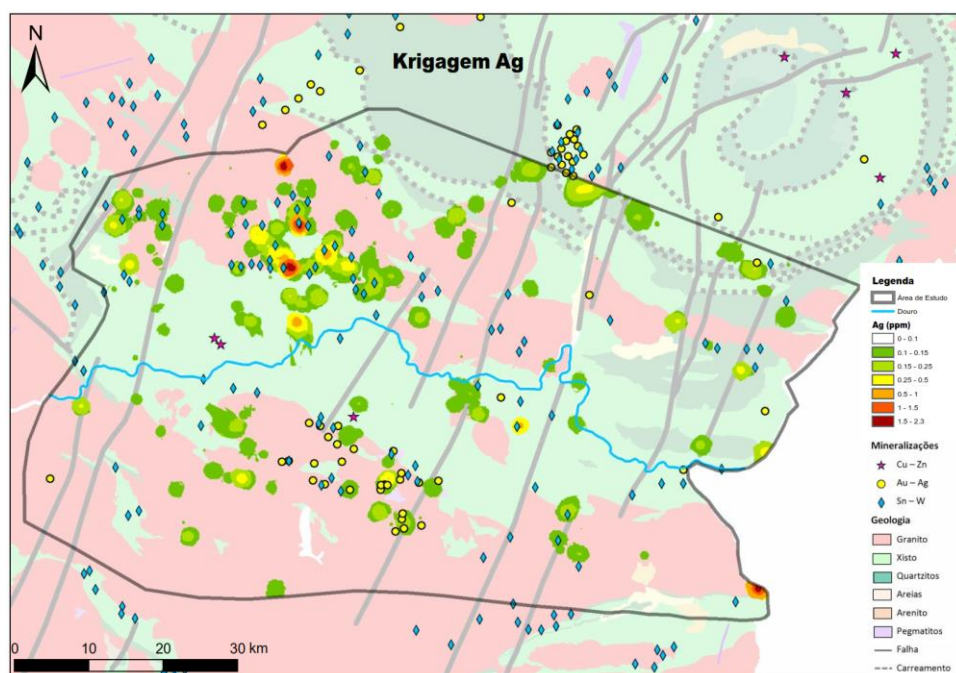


Figura 35 - Mapa geoquímico da prata pelo método krigagem.

O Arsênio - As (Figura 36 e Figura 37) apresenta uma concentração superior à media crustal em praticamente toda a área de estudo embora se observem pontualmente anomalias de teores mais elevados, associadas a zonas envolventes a antigas explorações mineiras e/ou ocorrências minerais e na envolvente das zonas de falha.

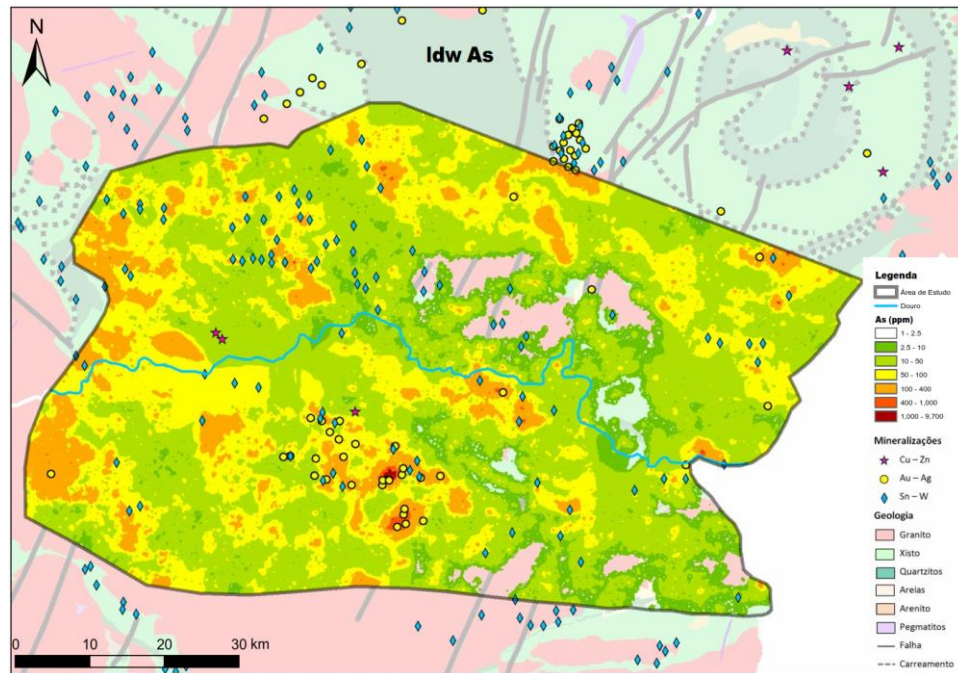


Figura 36 - Mapa geoquímico do arsênio pelo método idw.

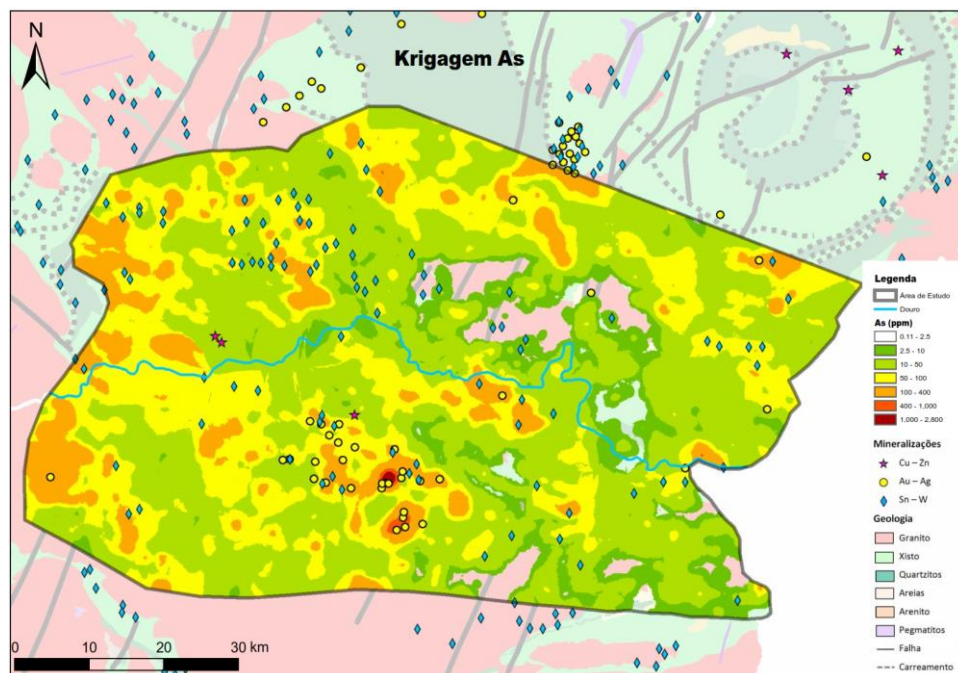


Figura 37 - Mapa geoquímico do arsênio pelo método krigagem.

O Antimónio –Sb (Figura 38 e Figura 39) apresenta anomalias pontuais e na zona norte da área de estudo observam-se também teores elevados, possivelmente associados a zonas de falha.

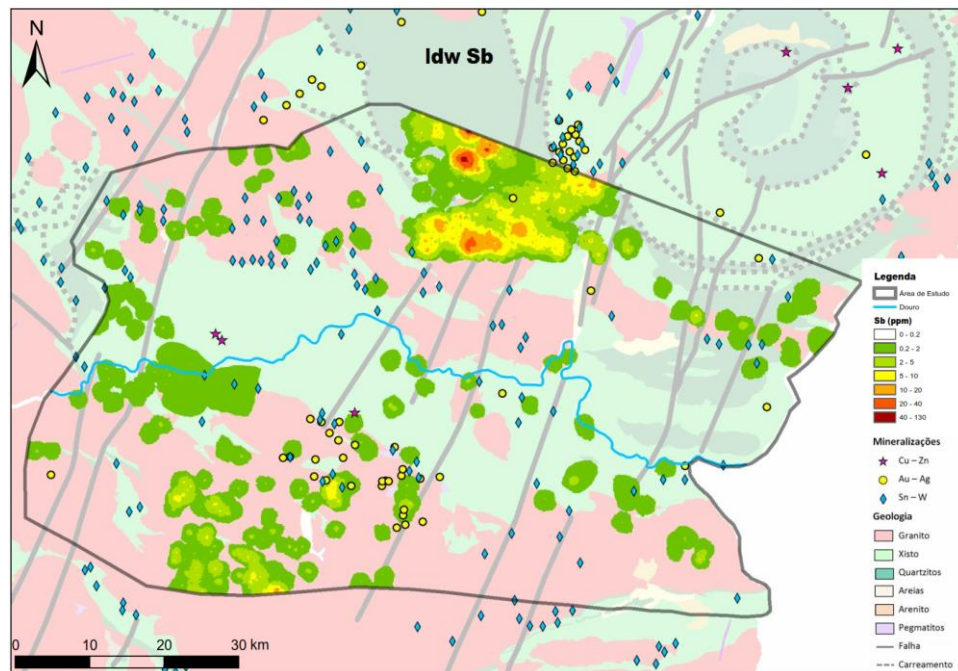


Figura 38 - Mapa geoquímico do antimónio pelo método idw.

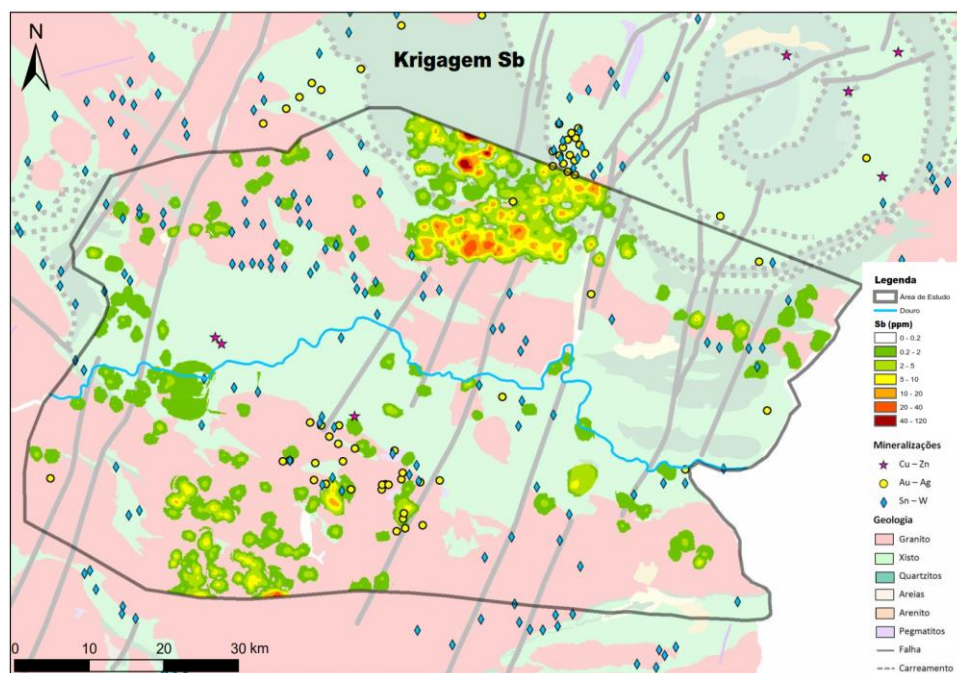


Figura 39 - Mapa geoquímico do antimónio pelo método krigagem.

O limite inferior do Índice de Metais Preciosos (I_{AA}) quando é superior a 30 delimita áreas potenciais, embora os setores de maior importância apresentem $I_{AA} > 50$. O sinal do As é dominante em relação aos

restantes elementos do I_{AA} , o que será normal dada a quantidade de amostras cujos teores dos outros elementos se encontram abaixo do LD. Os valores mais elevados confinam-se a terrenos graníticos, em torno de zonas de falha tardi-Variscas e/ou na proximidade de ocorrências minerais documentadas e/ou escombrelas de antigas explorações mineiras (Figura 40 e Figura 41).

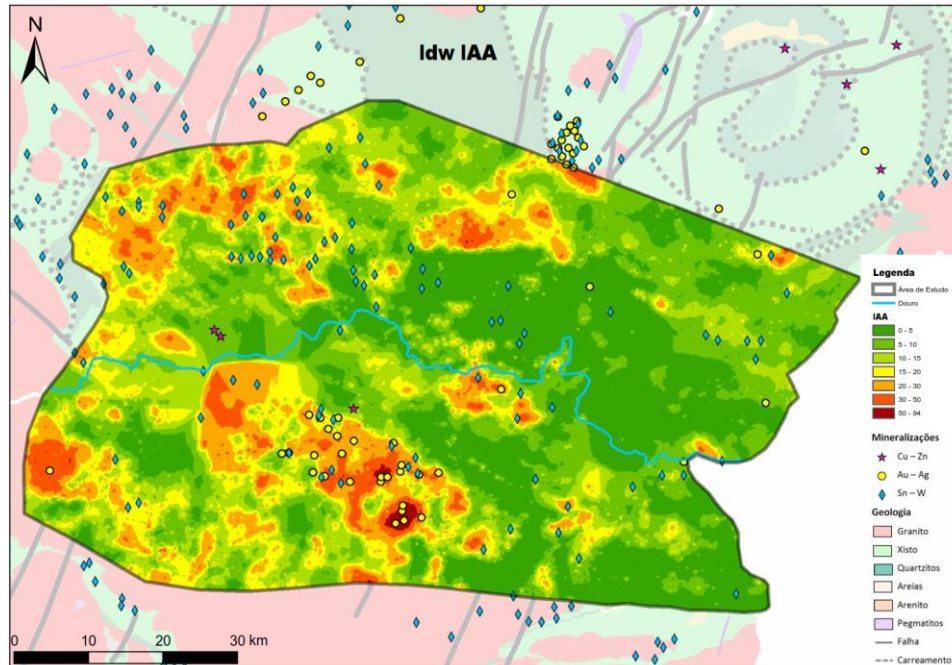


Figura 40 - Mapa geoquímico do Índice dos Metais Preciosos (I_{AA}) pelo método idw

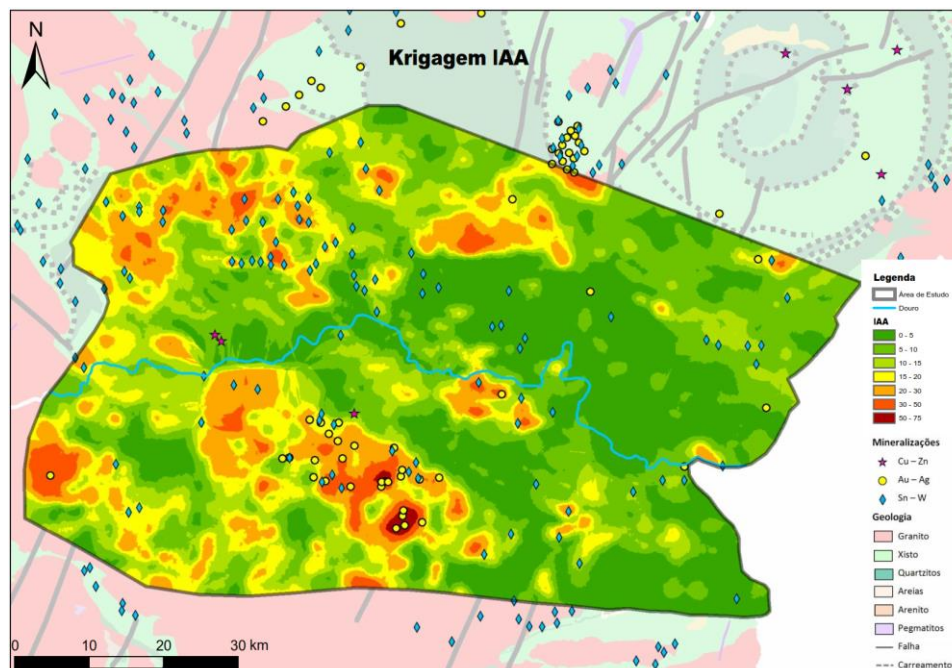


Figura 41 - Mapa geoquímico do Índice dos Metais Preciosos (I_{AA}) pelo método krigagem

Comparando o mapa geoquímico da prata com o mapa geoquímico do I_{AA} , podemos verificar que: no mapa geoquímico da prata observam-se anomalias na proximidade de antigas explorações minerais, em particular de Sn e W; no mapa geoquímico do I_{AA} , sendo o As um dos elementos dominantes, evidência as anomalias na envolvente de antigas explorações mineiras de Au e Ag.

Com a cokrigagem entre o Ag e o I_{AA} (Figura 42), obtém-se um mapa geoquímico mais completo que o mapa do Ag, ou seja, o índice ajuda a estimar valores de Ag para os locais em que não existem esses valores. Podemos observar que muitas das anomalias de teores elevados se encontram em áreas de antigas explorações mineiras.

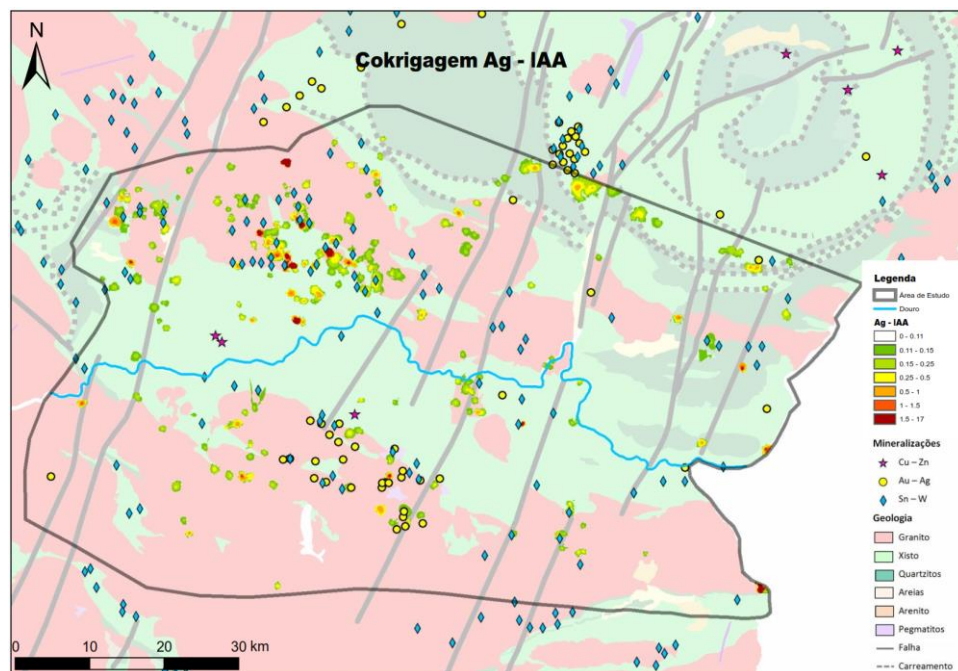


Figura 42 - Mapa geoquímico da cokrigagem entre o Ag e o I_{AA}

O principal objetivo desta dissertação foi explorar a utilização de ferramentas de interpolação espacial, nomeadamente o inverso da distância, a krigagem e a cokrigagem, para fazer a interpolação espacial de concentrações de elementos químicos em amostras de sedimentos de corrente, recolhidas nas redes de drenagem do rio Douro, de forma a detetar zonas de eventuais anomalias.

Tratando-se de uma rede de drenagem em terrenos constituídos essencialmente por litologias do Complexo Xisto-Grauváquico e diversos corpos graníticos de idade Paleozóica, a aferição expedita da fiabilidade do banco de dados, foi confirmada através da elevada correlação inversa entre SiO_2 e Al_2O_3 . A análise estatística para cada elemento mostrou que 17 dos 24 elementos apresentam concentrações médias superiores à média da crosta continental; no caso do Be, Cd, Nb, Mo, Sb, W e Bi pelo menos 50% das amostras estão abaixo do LD; todos os elementos apresentam assimetria positiva. Através da análise estatística bivariada é possível observar que a correlação entre os diversos elementos evidência os seguintes aspectos: a presença de litologias metasedimentares na área em estudo (através do SiO_2 e Al_2O_3); a presença de domínios mineralizados de W-Sn e Au-Ag; e que a correlação entre os índices geoquímicos e elementos que o compõem é na generalidade baixa. O facto das correlações não serem significativas pode ter várias interpretações: a inadequabilidade ou má definição dos índices geoquímicos; a existência de sinais geoquímicos com fontes geológicas/metassomáticas diversas (incluindo, possivelmente, a antropogénica) o que inviabiliza a definição dos índices com base em critérios geoquímicos e metalogenéticos únicos; a elevada sensibilidade aos dados censurados (abaixo do LD), não sendo válido para todos será sensível por exemplo para a situação do I_{SW} e I_{AA} .

Para os diferentes testes de validação realizados, utilizaram-se amostras independentes das utilizadas para a interpolação, num total de mais de 10 mil ensaios. Nos testes realizados para o Cu observou-se que na generalidade o erro é elevado e independente da densidade de amostragem. A qualidade da interpolação só se degrada quando a distância entre amostras é superior a 1km. Os resultados dos testes são semelhantes, embora no caso da krigagem com modelo esférico, 20 vizinhos, patamar =21 e efeito de pepita =26 (ensaio realizado sem os outliers do Cu), o erro é marginalmente inferior em relação aos restantes testes. Os resultados dos testes realizados com o idw e com a krigagem não são significativamente diferentes. Nos testes realizados para o SiO_2 os resultados são bastante satisfatórios. A qualidade da interpolação só se degrada quando a distância entre amostras é cerca de 1km. Os resultados obtidos com o melhor modelo de krigagem e o modelo de idw com potência otimizada são virtualmente idênticos.

A partir dos modelos que apresentaram os melhores resultados e dos elementos/índices, realizou-se a interpolação para a área em estudo. A qualidade da interpolação varia entre 0.08 (para o Ag) e 0.57 (para o SiO_2). No caso dos índices geoquímicos a qualidade de interpolação é superior, variando entre 0.49 (para o I_{AA}) e 0.66 (para o I_{MB}).

Para a obtenção de mapas geoquímicos integrados e realistas utilizou-se a distribuição espacial dos valores de concentração de elementos selecionados e dos valores de índices geoquímicos construídos em função da natureza particular dos principais sistemas mineralizantes. Os índices geoquímicos procuram condensar a informação de natureza mineralógica e geoquímica, sendo também úteis para uso como variáveis secundárias na estimação espacial de variáveis primárias, em particular daquelas com um elevado número de amostras abaixo do limite de deteção, como é o caso das distribuições de concentração em Ag e W.

O Índice do Tungsténio e Estanho (I_{SW}) permite identificar depósitos de W e Sn, que surgem naturalmente associados. As mineralizações mais comuns são as filonianas e alguns pegmatitos contendo fases portadoras de Sn e/ou W associadas a granitos; depósitos do tipo skarn com scheelite-volframite correspondem a níveis calcossilicatados do CXG ou níveis particulares em sequências do Silúrico sujeitos a metassomatismo, geralmente induzido pelo contacto com intrusões graníticas. Quando o $I_{SW} > 20$ delimita áreas potenciais, especialmente se as mesmas envolverem domínios com $I_{SW} > 30$. Os valores mais elevados correspondem a anomalias pontuais na envolvente de antigas explorações minerais ou nas bordaduras das principais zonas de falha tardi-D3.

O Índice dos Metais Básicos (I_{MB}) delimita zonas ricas em sulfuretos os quais se associam frequentemente a mineralizações de Sn/W ou de Au/Ag. Os elevados teores de Cu observados junto às margens do rio Douro, estão possivelmente relacionados com a atividade antropogénica da plantação da vinha. Os elevados teores de Zn parecem estar associadas às zonas de falhas. Quando o $I_{MB} > 40$ delimita áreas potenciais, embora os sectores de maior importância apresentem $I_{MB} > 50$. Os teores mais elevados ocorrem em domínios em que os diferentes metais básicos concorrem no mesmo local e na proximidade das zonas de falha. O mapa geoquímico resultante da cokrigagem entre o Cu e o I_{MB} é semelhante ao mapa do Cu, não acrescentando informação relevante ao elemento, isto deve-se ao facto do sinal do Cu (possivelmente resultante da atividade antropogénica) se sobrepor ao sinal dos restantes elementos que compõem o I_{MB} .

O Índice dos Metais preciosos (I_{AA}) permite delimitar eventuais depósitos de metais preciosos. Na ZCI observa-se com frequência, uma assinatura geoquímica com teores elevados em Ag, o qual se associa com frequência ao Au em filões hidrotermais quartzosos com sulfuretos. Quando o $I_{AA} > 30$ delimita áreas potenciais, embora os setores de maior importância apresentem $I_{AA} > 50$. Os valores mais elevados

confinam-se a terrenos graníticos em torno de zonas de falha tardi-Variscas e/ou na proximidade de ocorrências minerais documentadas e/ou escombreyas de antigas explorações mineiras.

Os resultados obtidos para os elementos estudados têm, em relação aos índices geoquímicos, um erro maior devido à assimetria dos dados, à dispersão dos valores anómalos e ao facto da densidade de amostragem não permitir identificar a correlação espacial a distâncias inferiores à da amostragem. Os resultados associados à interpolação realizada com os índices geoquímicos permitem ter uma perspectiva otimista na sua utilização em prospeção geoquímica.

Aparentemente numa primeira fase de um estudo, para identificar-se áreas alvo numa área de estudo alargada pode-se utilizar o método de interpolação idw sem prejuízo nos resultados. Após a identificação do alvo deve ser feito o estudo detalhado da área identificada. A cokrigagem pode ser uma mais-valia para a resolução do importante problema de mapeamento de elementos químicos quando a informação é incompleta (i.e. abaixo do limite de deteção).

O facto de os mapas dos índices geoquímicos revelarem os valores de ajuste mais elevados, resultando os índices de uma combinação da informação de natureza metalogenética, mineralógica e geoquímica, requerem uma análise mais detalhada em trabalhos futuros pois torna-se difícil a individualização das diferentes componentes nos resultados finais obtidos.

Podemos assim concluir que os resultados obtidos são promissores e consistentes com a informação geológica e mineira disponível para a região estudada.

- ARMSTRONG, M. (1998). *Basic linear geostatistics*, Springer, Berlin.
- DARNLEY, A. e GARRETT, R. (1990). *International Geochemical Mapping Special Issue*, Journal of Geochemical Exploration.
- DAVIS, J (2002). *Statistics and Data Analysis in Geology*, Third Edition, Kansas Geological Survey, The University of Kansas, John Wiley & Sons, New York.
- FERREIRA A. (2000). *Dados Geoquímicos de Base de Sedimentos Fluviais de Amostragem de baixa Densidade de Portugal Continental*, Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- JOHNSTON, K. et al. (2001). *Using ArcGis® Geostatistical Analyst (ESRI®)*, ESRI Press. Redland, California, USA.
- KRIGE, D. (1951). *A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand*, J. of the Chem., Metal. and Mining Soc., South Africa.
- LI, J. and HEAP, A. (2008). *A Review of spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists*, Technical Report GeoCat # 68229, Geoscience Australia, Canberra.
- LUZ, F. (2011). *A geoquímica de solos e sedimentos de corrente na prospecção de mineralizações sulfuretas no sector NE da Zona Sul Portuguesa*, Tese de Mestrado em Geologia Económica, FCUL, Lisboa.
- MARTINS R., SOUSA L. (2002). *Sistemas de Informação Geográfica para aplicações de Robótica Oceanográfica*.
- MATEUS, A e NORONHA, F. (2010). *Sistemas mineralizantes epigenéticos na Zona Centro-Ibérica; Expressão da estruturação orogénica Meso- a Tardi-varisca*, Publicação comemorativa do “Ano Internacional do Planeta Terra”, Associação Portuguesa de Geólogos e Sociedade Geológica de Portugal, Porto.
- NEIVA, C. (1944). *Jazigos Portugueses de Cassiterite e de Wolframite*, Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal, Tomo XXV, Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos, Lisboa.
- NETO, M. e ROCHA, A. (2010). *Noções de Prospeção e Pesquisa Mineral para Técnicos em Geologia e Mineração*, IFRN, Natal.
- NORONHA F., et all (2013). *II.1.8. Jazigos filonianos hidrotermais e aplitepegmatíticos espacialmente associados a granitos (norte de Portugal)*, Geologia de Portugal, Volume I – Geologia Pré-mesozóica de Portugal, Escolar Editora.
- NORONHA F., LIMA A., GUEDES A. (2014). *Potencialidades de Portugal em minerais críticos*, Centro de Geologia da Universidade do Porto, Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da FCUP, Porto.

NORONHA F., RAMOS J. (1993). *Mineralizações auríferas primárias no norte de Portugal*, Algumas reflexões, Cuaderno Lab. Xeolóxico de Laxe.

OLEA, R.A. (1999). *Geostatistics For Engineers and Earth Scientists*, Kluwer Academic Publishers, Kansas Geological Survey, The University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA.

SANT'OVAIA H., MARTINS H., NORONHA F. (2013). *Granitos Variscos portugueses oxidados e reduzidos e sua associação com mineralizações hidrotermais de W e Sn: resultados se susceptibilidade magnética*, Comunicações Geológicas, LNEG, Lisboa.

SCHERMERHORN, L. (1981). *Framework and evolution of Hercynian mineralization in the Iberian Meseta*, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

SOARES, A. (2006). *Geostatística para as ciências da terra e do ambiente*, Segunda edição, IST Press, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

THADEU, D (1965) – *Noticia Explicativa da Carta Mineira de Portugal*, na escala 1: 500 000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Endereços na internet

ArcGis Resources [Web Page] –

«<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1%20/index.html#/002w0000007v000000>» Data de acesso: Novembro 2015

Cartografia Geológica e Recursos Minerais [Web Page] - «<http://geoportal.lneg.pt/>» Data de acesso: Janeiro 2016

Composition of the Continental Crust [Web Page] -

«<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080959757003016>» Data de acesso: Janeiro 2016

Anexo A – Amostras de Sedimentos de Corrente por Carta Geológica

Anexo B – Amostras de Sedimentos de Corrente – Elementos Químicos e Índices Geoquímicos

Anexo C – Distância ao vizinho mais próximo

Anexo D – Distribuição das Amostras na Área de Estudo

Anexo E – Análise Estatística Uni-elementar e Análise Estatística dos Índices Geoquímicos

Anexo F – Análise Estatística Bivariada

Anexo G – Testes realizados com o Cu

Anexo H – Testes realizados com o SiO₂

Anexo I – Qualidade do Ajustamento – R²

Anexo J – Mapas Geoquímicos

Nota: Todos os anexos em suporte digital.